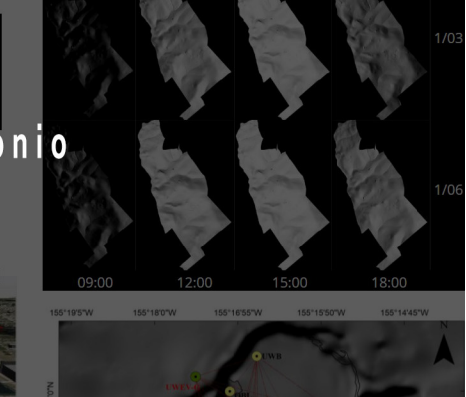
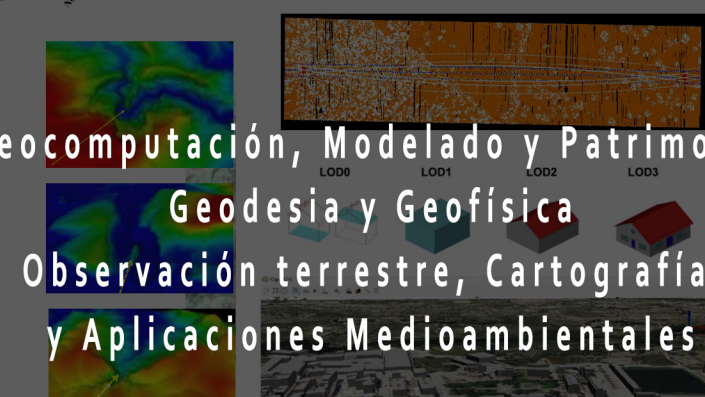
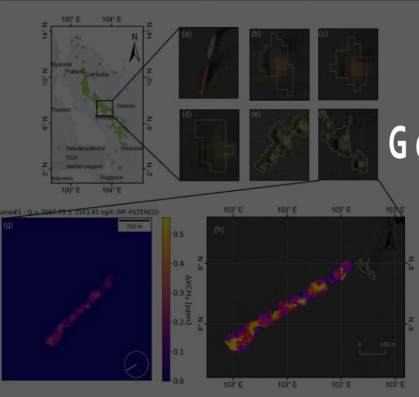
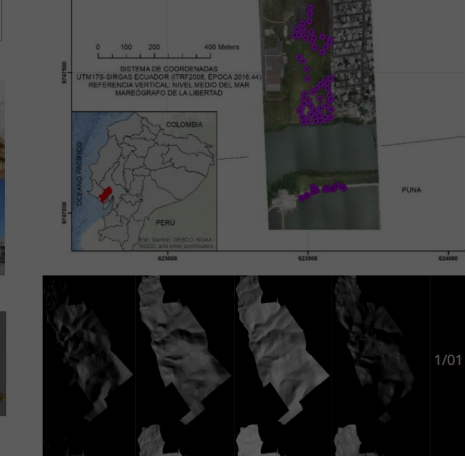
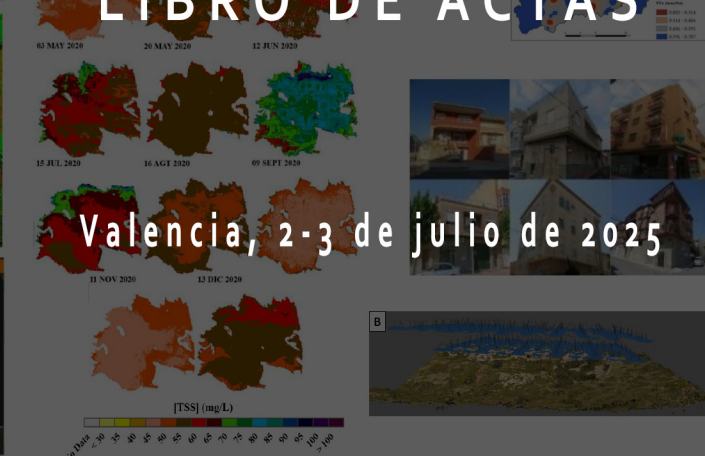
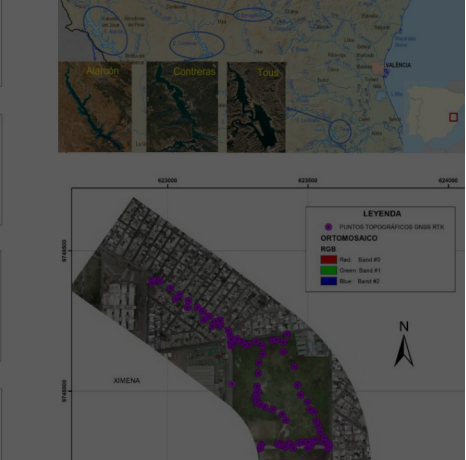
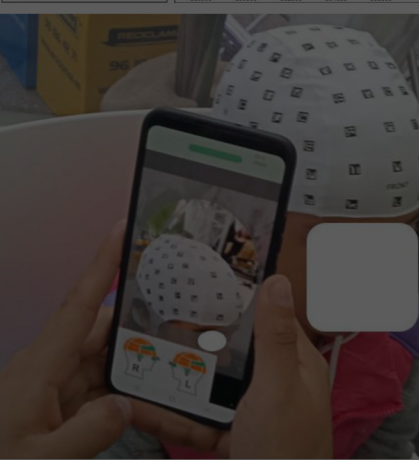
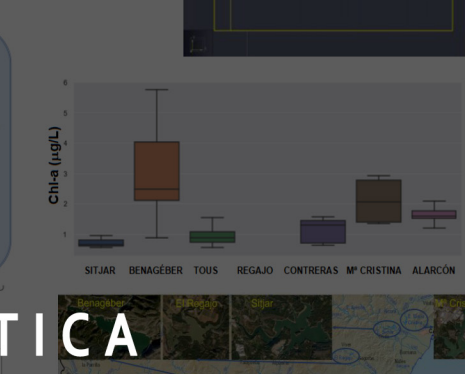
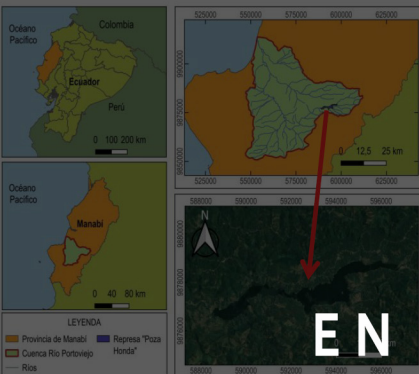
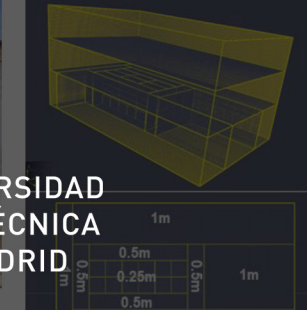


QUINTO CONGRESO EN INGENIERÍA GEOMÁTICA

CIGeo

LIBRO DE ACTAS

Valencia, 2-3 de julio de 2025

Geocomputación, Modelado y Patrimonio
Geodesia y Geofísica
Observación terrestre, Cartografía
y Aplicaciones Medioambientales

Colección Congresos UPV

Quinto Congreso en Ingeniería Geomática - CIGeo 2025

Los contenidos de esta publicación han sido evaluados por el Comité Científico que en ella se relaciona y según el procedimiento que se recoge en

<http://ocs.editorial.upv.es/index.php/CIGeo/CIGeo2025/about/editorialPolicies>

© Editores científicos

José Luis Lerma García

Ángel Martín Furones

Editado por

Editorial Universitat Politècnica de València, 2025

www.lalibreria.upv.es / Ref.: 6810_01_01_01

ISBN: 978-84-1396-311-2

DOI: <https://doi.org/10.4995/CIGeo2025.2025.21332>



Quinto Congreso en Ingeniería Geomática - CIGeo 2025

se distribuye bajo una [licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Basada en una obra en <http://ocs.editorial.upv.es/index.php/CIGeo/CIGeo2025>

COMITÉS DEL CONGRESO

Comité Organizador

- Ángel Martín Furones. *Director del Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, UPV*
- José Juan Arranz Justel. *Director de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía, UPM*
- José Luis Lerma García. *Coordinador del programa de doctorado en ingeniería Geomática, UPV*
- Jorge Gaspar Escribano. *Coordinador de la comisión académica UPM del programa de doctorado en ingeniería Geomática, UPM*
- José Carlos Martínez Llario. *Subdirector de Infraestructuras del Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, UPV*
- Antonio Vázquez Hoehne. *Director del Departameto de Ingeniería Topográfica y Cartografía, UPM*

Comité Científico

- Álvarez Taboada, M.F. (U. León)
- Anquela Julián, A.B. (UPV)
- Ariza López, F.J. (U. de Jaén)
- Baeslga Moreno, S. (UPV)
- Benito Oterino, B. (UPM)
- Fernández Torres, J. (CSIC)
- Gaspar Escribano, J. (UPM)
- Hermosilla Gómez, T. (Canadian Forest Serv.)
- Lerma García, J.L. (UPV)
- Manso Callejo, M.A. (UPM)
- Martín Furones, A. (UPV)
- Martínez Llario, J.C. (UPV)
- Molina Sánchez, I. (UPM)
- Núñez Andrés, A. (UPC)
- Padín Devesa, J. (UPV)
- Pardo Pascual, J.E. (UPV)
- Rodríguez González, P. (U. de León)
- Sánchez García, E. (ICTS-SOCIB)
- Sapena Moll, M. (IPL UV)
- Soriano González, J. (ICTS-SOCIB)
- Staller Vázquez, A. (UPM)
- Vázquez Hoehne, A. (UPM)
- Vigo Aguiar, I. (U. de Alicante)

PATROCINADORES Y ENTIDADES COLABORADORAS

Patrocinadores del Congreso

- AL-TOP Topografía
- ESRI
- Hexagon Leica Geosystems / Instop

Entidades colaboradoras en el programa de doctorado

- Agencia Espacial Europea (ESA)
- Al-top Topografía
- Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya
- CSIC
- GeoNumerics
- Hexagon Leica Geosystems / Instop
- Institut Cartogràfic Valencià
- Instituto Geográfico Nacional
- Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico
- TOPCON

PREFACIO

El V Congreso en Ingeniería Geomática tiene como objetivo reunir a científicos, académicos y estudiantes de doctorado para intercambiar y compartir sus resultados de investigación e innovación relativos a cualquier disciplina Geomática. Ofrece una plataforma interdisciplinar de primer nivel para presentar y discutir las innovaciones, tendencias, preocupaciones, desafíos y soluciones adoptadas en los diferentes campos de la Geomática.

Este Congreso, de carácter bienal, nace dentro del marco que proporciona el programa de doctorado interuniversitario en Ingeniería Geomática por la Universidad Politécnica de Valencia y la Universidad Politécnica de Madrid.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ANALYSIS OF FIRE BEHAVIOR IN SEMI-REAL FOREST SCENARIOS BY INTEGRATING TLS DATA INTO PHYSICAL SIMULATION MODELS.....	1
<i>Marina Simó-Martí, Pablo Crespo-Peremarch, Jesús Torralba, Luis Ángel Ruiz</i>	
DETECTION OF OFFSHORE OIL AND GAS PLATFORMS AND ASSOCIATED METHANE EMISSIONS USING SATELLITES.....	8
<i>Lulu Si, Shanyu Zhou, Itziar Irakulis-Loitxate, Javier Roger, Javier Gorroño, Adriana Valverde, Luis Guanter</i>	
EVALUACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DEL ESTADO TRÓFICO Y ECOLÓGICO DE LA ALBUFERA DE VALENCIA MEDIANTE TELEDETECCIÓN	13
<i>Lisette Sánchez-Pérez, Xavier Sòria-Perpinyà, Vicente Caselles, Jesús Delegido</i>	
NUMERICAL MODEL FOR THE SIMULATION OF SOIL WATER FLOW: EVAPORATION ANALYSIS.....	22
<i>Ángel del Vigo</i>	
MOBILE PHOTOGRAMMETRY AND SEMI-SYNTHETIC 3D DATA FOR CLASSIFYING CRANIAL PATHOLOGIES WITH AI	29
<i>Omar Christian Quispe-Enríquez, José Luis Lerma</i>	
AUTOMATED FAÇADE IMAGE CLASSIFICATION MODEL FOR URBAN ANALYSIS IN MURCIA, SPAIN	35
<i>María De La Cruz, Sandra Martínez-Cuevas, César García-Aranda, María del Carmen Morillo-Balsera</i>	
DOCUMENTACIÓN DE EDIFICIOS DEL PATRIMONIO HISTÓRICO: FUSIÓN DE DATOS MULTISENSOR Y APRENDIZAJE PROFUNDO	41
<i>Javier Raimundo</i>	
AN OPEN SOFTWARE PLATFORM FOR SIMULATING THE WET BULB DYNAMICS IN DRIP IRRIGATION SYSTEMS: INITIAL STEPS	50
<i>Fernando del Águila-Rodríguez, Ángel del Vigo</i>	
EVALUATING THE PERFORMANCE OF POPULAR GRAPH SEARCH ALGORITHMS FOR SHORTEST PATH ANALYSIS IN SPATIAL DATABASES	58
<i>Julio Armando Cuellar-Gutiérrez, Calimanut Ionut Cira, Miguel Ángel Manso-Callejo</i>	
DEEP LEARNING AND PHOTOGRAMMETRY: A REVIEW OF CURRENT ADVANCES AND FUTURE DIRECTIONS	64
<i>Javier Felipe Moncada-Sánchez, Juan F. Prieto, Serafín López-Cuervo</i>	
SENSITIVITY STUDY FOR THE CONTINUOUS GRAVIMETRIC NETWORK OF THE KĪLAUEA VOLCANO IN HAWAII: FIRST RESULTS	74
<i>Alejandra Bermeo-Cevallos, Ashton F. Flinders, José Fernández</i>	
POSICIONAMIENTO GNSS PARA LOS VÉRTICES DE LAS GEOMETRÍAS JURÍDICAS: MÉTODO COMPARATIVO ENTRE SISTEMAS GNSS	83
<i>Pedro Jesús Ortiz-Toro, José Luis Berné-Valero, Natalia Garrido-Villén</i>	
IMPACT OF TOPOGRAPHY AND EARTHWORKS IN UTILITY-SCALE PHOTOVOLTAIC PROJECTS.....	89
<i>Conrado García-Salinas, Ángel Martín-Furones, Ana Belén Anquela-Julián</i>	

ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE DATOS TOPOGRÁFICOS GENERADOS MEDIANTE FOTOGRAMETRÍA CON DRONES Y GNSS.....	94
<i>César Leiva, Izar Sinde, Alexander Robayo</i>	
HACIA UNA GEOINFORMACIÓN MÁS ACCESIBLE Y POTENTE: EL IMPACTO DE LOS NUEVOS ESTÁNDARES.....	101
<i>Jordi Pallàs, M. Amparo Núñez-Andrés, Daniel Gómez</i>	
INTEGRACIÓN DE GEOMÁTICA PARTICIPATIVA PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL AGUA EN SISTEMAS DE RIEGO COMUNITARIOS: CASO DE ESTUDIO CANAL DE RIEGO CAYAMBE-PEDRO MONCAYO (ECUADOR).....	109
<i>Catalina Elizabeth Sandoval-Montenegro, Antonio Vázquez-Hoehne, Charles Jim Cachipundo-Ulcuango</i>	
CIENCIA CIUDADANA GEOGRÁFICA COMO FUENTE DE DATOS EN LA INGENIERÍA GEOMÁTICA.....	120
<i>Sandra Lucía Hernández-Zetina, Ana Belén Anquela-Julián, Ángel Esteban Martín-Furones</i>	
HARMONIZED 3D BUILDINGS SPATIAL DATABASE FOR SUSTAINABLE SMART CITIES	126
<i>Rafael Sierra-Requena, José Carlos Martínez-Llario, Eloina Coll-Aliaga</i>	
TÉCNICAS DE ANÁLISIS ESPACIAL EN EL ESTUDIO DE DELITOS: ESTADO DEL ARTE	134
<i>Yenny Espinosa-Gómez, Antonio Vázquez-Hoehne</i>	
APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA LIDAR A LA CARTOGRAFÍA Y MODELACIÓN DE LÍNEAS ELÉCTRICAS DE ALTA TENSIÓN	145
<i>Mateo Pastrana, Nieves Quesada, Victor Cicuéndez, Javier Coronel, Alfonso Gómez</i>	
MAPPING OF HOTSPOTS CELLS AND BELTS BASED ON SPATIAL ANALYSIS OF MARITIME MIGRATION INCIDENT LOCATIONS	151
<i>Donatien Agbissoh Otote, Antonio Vázquez-Hoehne</i>	
ESTUDIO ESPACIO-TEMPORAL DE LOS NIVELES DE EUTROFIZACIÓN EN EL EMBALSE POZA HONDA – ECUADOR MEDIANTE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN	158
<i>Joyce Solórzano, Johanna Ayala-Izurietta, Lissette Sánchez-Pérez, Jesús Delegido</i>	
TÉCNICAS FOTOGRAMÉTRICAS PARA EL ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE ELEMENTOS PRESENTES EN UN CAMPO DE ESTRUCTURAS DE IMPACTO LOCALIZADO EN LA COMUNIDAD VALENCIANA	168
<i>Eduardo Loma-Ossorio Blanch, José Luis Lerma</i>	
CALIDAD DEL AGUA EN EMBALSES DE AGUAS CLARAS DE LA CUENCA DEL JÚCAR CON IMÁGENES SENTINEL-2 NIVEL L2A.....	174
<i>Gabriel R. Caballero, Jesús Delegido, Xavier Sòria-Perpinyà, Lissette Sánchez-Pérez, Antonio Ruiz-Verdú, Bárbara Alvado, María Concepción Durán, Damián Ortega, Eduardo Vicente-Pedros, José Moreno</i>	
COMMUNITY-BASED GEOSPATIAL MULTI-HAZARD ANALYSIS OF THE BUILT HERITAGE IN GUARANDA, ECUADOR.....	180
<i>Alejandra Benavides-Ocampo, Jorge M. Gaspar-Escribano, Carlos Ocampo-León, Leo Zurita-Arthos</i>	
DESIGN CRITERIA FOR ARTIFICIAL CONTROL TARGETS FOR POINT CLOUDS	188
<i>Francisco Javier Ariza-López, Juan Francisco Reinoso-Gordo, Juan José González-Quiñones, Manuel Antonio Ureña-Cámara</i>	

CIGeo

**Quinto Congreso
en Ingeniería Geomática**

Proceedings

ANALYSIS OF FIRE BEHAVIOR IN SEMI-REAL FOREST SCENARIOS BY INTEGRATING TLS DATA INTO PHYSICAL SIMULATION MODELS

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL FUEGO EN ESCENARIOS FORESTALES SEMIRREALES MEDIANTE LA INTEGRACIÓN DE DATOS TLS EN MODELOS FÍSICOS DE SIMULACIÓN

Marina Simó-Martí*, Pablo Crespo-Peremarch, Jesús Torralba, Luis Ángel Ruiz

Geo-Environmental Cartography and Remote Sensing Group (CGAT), Department of Cartographic Engineering, Geodesy and Photogrammetry, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, 46022 València, Spain. , msimmar@upv.es; , pabcrepe@cgf.upv.es; , jetorpe@upv.es; , laruiz@upv.es

How to cite: M. Simó-Martí, P. Crespo-Peremarch, J. Torralba y L.Á. Ruiz. 2025. Analysis of fire behavior in semi-real forest scenarios by integrating TLS data into physical simulation models. En libro de actas: *Quinto Congreso en Ingeniería Geomática*. Valencia, 2 – 3 de Julio de 2025. <http://dx.doi.org/10.4995/CIGeo2025.2025.19873>

Abstract:

In view of the increasing intensity and frequency of large forest fires, the study and simulation of fire behavior in Mediterranean forests appears as a crucial task to define prevention and extinction strategies. The physical model Fire Dynamics Simulator (FDS) allows the analysis of fire behavior in 3D scenarios at high levels of resolution by introducing LiDAR point clouds to describe the structure and characteristics of the vegetation. The main objective of this paper is the analysis of fire behavior in Mediterranean forest semi-real scenarios, by modifying structural properties of the forest related to the horizontal and vertical continuity of the vegetation. To achieve this goal, a methodology has been developed to generate scenarios from real segmented and voxelized individuals of Mediterranean shrubland and tree species. These models were obtained from TLS (Terrestrial Laser Scanning) in plots located in *La Serra d'Espadà*. The methodology considers the distribution of biomass at individual and voxel level, taking into account a heterogeneous distribution of the bulk density of forest fuel, estimated based on the proportion of returns from the point cloud. Finally, for the analysis of the results, the evolution graphs of the following model output variables have been studied: the rate of spread, the heat release rate, the mass loss rate and the percentage of biomass consumed. Preliminary findings indicate that horizontal continuity of vegetation is the main driver for the development of steady and sustained fires.

Key words: Horizontal fuel continuity, LiDAR, Fire modelling, Bulk density, FDS

Resumen:

Ante el aumento de la intensidad y frecuencia de los grandes incendios forestales, el estudio y simulación del comportamiento del fuego en los bosques mediterráneos aparece como una tarea crucial para definir las estrategias de prevención y extinción. El modelo físico *Fire Dynamics Simulator* (FDS) permite analizar el comportamiento del fuego en escenarios 3D a altos niveles de resolución mediante la introducción de nubes de puntos LiDAR que describen de forma precisa la estructura y las características de la vegetación. El objetivo principal del presente artículo es el análisis del comportamiento del fuego en escenarios semirreales de bosque mediterráneo, modificando propiedades estructurales del bosque relacionadas con la continuidad horizontal y vertical de la vegetación. Para su consecución, se ha desarrollado una metodología que permite generar escenarios a partir de individuos reales segmentados y voxelizados de especies de matorral y árboles mediterráneos. Estos modelos se obtuvieron del escaneo TLS (*Terrestrial Laser Scanning*) de las parcelas de estudio localizadas en *La Serra d'Espadà*. La metodología contempla la distribución de la biomasa a nivel de individuo y vóxel teniendo en cuenta una distribución heterogénea de la densidad aparente (o *bulk density*) del combustible forestal, estimada en función de la proporción de retornos de la nube de puntos. Finalmente, para el análisis de los resultados se han estudiado los gráficos de evolución de las siguientes variables de salida del modelo: la velocidad de propagación del fuego, la tasa de liberación de calor, la tasa de consumo de biomasa y el porcentaje de biomasa consumida. Los resultados preliminares indican que la continuidad horizontal de la vegetación es el principal impulsor para el desarrollo y la progresión de incendios.

Palabras clave: Continuidad horizontal del combustible, LiDAR, Modelización del fuego, Densidad aparente del combustible, FDS

* Corresponding Author: Marina Simó-Martí, msimmar@upv.es

1. Introduction

Over the past few decades, forest fires have assumed an increasingly significant role in the Mediterranean forest landscape. What was once considered a natural ecological process has evolved into a major environmental issue. Even though the total number of wildfires in Spain has declined, large forest fires (LFF)—defined as those impacting more than 500 hectares—have become more intense, more destructive, and more frequent beyond the traditional summer season (López and López 2019). In 2022, LFFs accounted for just 0.54% of all recorded fire (MITECO 2023) yet they were responsible for burning 80.78% of the total affected area.

Several factors explain this shift in fire dynamics. Climate change has intensified the environmental conditions that trigger forest fuel ignitions, such as higher temperatures and extended droughts. Simultaneously, the accumulation and continuity of woody vegetation have grown over recent decades. We refer to fuel continuity as “the degree or extent of continuous or uninterrupted distribution of fuel particles in a fuel bed thus affecting a fire’s ability to sustain combustion and spread” (Drury 2020). This increase is largely due to forest conservation policies, rural exodus, a decline in forest resources extraction, the reduction of extensive livestock grazing, and insufficient forest management interventions (Pausas and Keeley 2021). Altogether, these factors lead to a greater build-up of combustible material in forests, resulting in larger burned areas and the release of more energy during each wildfire.

In this context, the study and simulation of fire behavior in forested areas, and especially in the forests of the Mediterranean region, appears to be a crucial task for defining forest fire prevention and suppression strategies. Currently, there is a wide variety of operational models capable of generating fire

simulations that can be divided in two main groups: semi-empirical models such as FARSITE (Finney 2006) and BehavePlus (Andrews 2014); and physics-based models such as FIRETEC (Linn *et al.* 2013) and FDS. This latter model allows for highly detailed 3D fire modelling in forest contexts (Mell *et al.* 2011) and it requires the input of three-dimensional forest structure data, which can be acquired with laser scanning remote sensing systems (LiDAR; Light Detection and Ranging).

The main objective of this paper is the modelling and analysis of fire behavior in Mediterranean forest semi-real scenarios, by modifying structural properties of the forest related to the horizontal continuity of the vegetation. To achieve this goal, a methodology has been developed to generate scenarios from real segmented and voxelized individuals of Mediterranean shrubland species.

2. Materials and Methods

2.1. Study area

The study area is located in *La Serra d'Espadà* Natural Park (Castelló, Spain) approximately at the coordinates 39.96° N and 0.41° W. The vegetation of the area is characteristic of the Mediterranean forest, with predominance of pine forests of *Pinus halepensis* Mill. and *Pinus pinaster* Aiton, occasionally accompanied by *Quercus suber* L. In our study plots there are scrub formations of *Cistus albidus* L., *Genista scorpius* (L.) DC., *Calicotome* sp., *Quercus coccifera* L., *Lavandula stoechas* L., *Daphne gnidium* L., *Ruscus aculeatus* L., *Salvia rosmarinus* Schleid. and *Pistacia lentiscus* L.

2.2. Data collection

Data collection is the first step in our designed workflow displayed in Figure 1. Surface fuel data and TLS data were acquired in our study area on different dates.

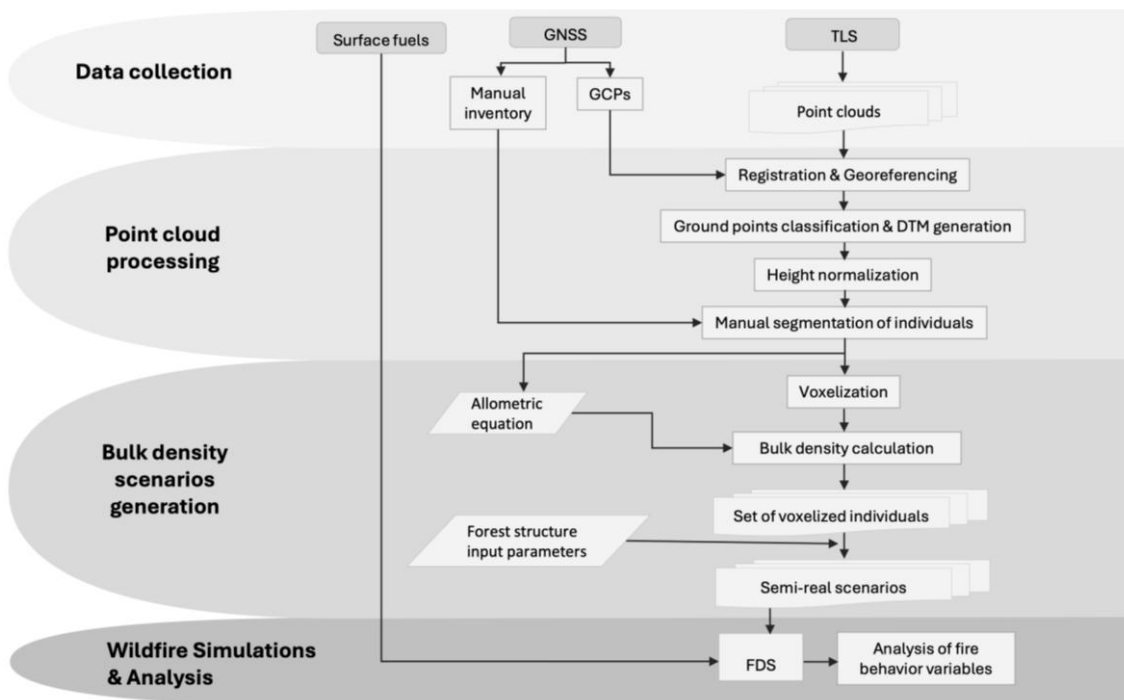


Figure 1: Methodology followed in the present work.

2.2.1. Terrestrial Laser Scanner point clouds

TLS data were recorded on May 18, 2023, using a Trimble TX6 3D laser scanner. This device emits a wavelength of 1,500 nm, an angular accuracy of 80 µrad, and a systematic range error of less than 2 mm. Five scans were taken in each plot: one central scan and four additional scans located 7.5 meters away in the cardinal directions, following the methodology proposed by Torralba *et al.* (2022). The scans were captured in maximum resolution mode with a recording time of 21 minutes. At least three spherical targets were placed in each plot and georeferenced using a Global Navigation Satellite System (GNSS) with a Leica Zeno FLX100 receiver, connected to the Valencia Reference Station Geodetic Network (ERVA) to obtain a Real-Time Kinematic (RTK) solution. This approach achieved a nominal horizontal accuracy of $\pm 2 \text{ cm} + 1 \text{ ppm}$ and a nominal vertical accuracy of $\pm 3 \text{ cm} + 1 \text{ ppm}$. Subsequently, the TLS point clouds were registered and georeferenced using Trimble RealWorks® v12.4 software, with an average registration and georeferencing accuracy of 0.004 m and 0.284 m, respectively.

2.2.2. Surface fuel field data

For the herbaceous layer characterization (composed by *Brachypodium retusum*), 4 microplots of 0.25 m² and a canopy cover of 100% were randomly sampled in January 2025. On each of them the depth (cm) and the fuel load (kg·m⁻²) were measured for further calculation of bulk density. For fuel load measurement, all the aboveground biomass of *B. retusum* was cut, dried, and weighed in the laboratory at a temperature of 105°C for 3 hours (Shreve *et al.* 2006).

2.3. Point clouds processing

After data collection, LAsTools (Isenburg 2018) was used for georeferencing TLS scans, identifying ground control points (GCPs), and creating the Digital Terrain Model (DTM) for each plot. Afterwards, the DTM was used for the normalization of the point cloud heights (Torralba *et al.* 2018). Once all the plots were normalized, individual plants (shrubs and trees) were segmented manually based on their location using CloudCompare (2024) (Stovall *et al.* 2017), obtaining a set of different models of each species as segmented point clouds.

2.4. Generation of vegetation bulk density scenarios

2.4.1. Bulk density calculation

Bulk density is a key parameter for wildfire modelling, as it describes the amount of biomass in an apparent volume, which includes empty spaces (Nunes *et al.* 2022). Therefore, bulk density at the voxel level was calculated for each segmented plant. First, the segmented point clouds were voxelized at a resolution of 0.25 m. Voxel values were calculated from the ratio between the number of returns of the voxel itself and the total number of returns of the segmented plant, resulting in values between 0 and 1. These values were used later for bulk density calculation. Second, fine fuel biomass at plant level was calculated from allometric equations by species and by plant fraction (leaves and twigs) (Eqs. 1, 2, and 3) (Sánchez-Pinillos *et al.* 2021)

and the dimensions measured on the segmented point cloud.

$$B_{finefuels} = 2.031 \cdot ((0.452 \cdot h^2) \cdot h \cdot 0.723)^{0.970} \quad (1)$$

$$B_{leaves} = \frac{B_{finefuels}}{3.115} \quad (2)$$

$$B_{twigs} = B_{leaves} \cdot 2.115 \quad (3)$$

where

h = height in m

$B_{finefuels}$ = biomass of fine fuels in kg

B_{leaves} = biomass of the leaf fraction in kg

B_{twigs} = biomass of twig fraction in kg

For the calculation of biomass at the voxel level, the biomass at the plant level was multiplied by the value of each voxel corresponding to the proportion of returns at the plant level. With this approach, we assumed that the density of LiDAR returns would be related to the distribution of biomass in the plant, considering a heterogeneous distribution of biomass within a plant. Finally, bulk density value at the voxel level was calculated from the biomass and volume values of each voxel (*i.e.*, biomass/apparent volume occupied, kg·m⁻³).

2.4.2. Semi-real scenarios

After having a set of different voxelized individuals from each species, we created semi-real scenarios selecting different input spatial parameters (Figure 2): regular or random distribution, number of species, density of plants, canopy height, dimensions, etc. In the present article, we present regularly distributed and monospecific scenarios of *Salvia rosmarinus* shrubland with different levels of horizontal continuity.

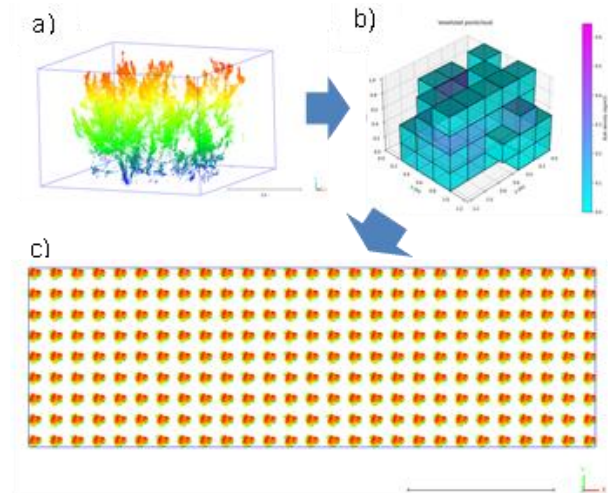


Figure 2: a) Segmented *S. rosmarinus* point cloud; b) Voxelized *S. rosmarinus* point cloud; c) Semi-real scenario of *S. rosmarinus* with 1 m gap separation between crowns.

The species *S. rosmarinus* was selected due to its high territorial representativeness in our study area and its high influence on fuel availability (Soriano and Quílez 2017). Based on their dimensions, we selected a morphologically representative individual of the *S. rosmarinus* voxelized models, and distributed it in a

domain of 20 m × 60 m. By varying the gap distance between individuals (0, 0.5, 1, 1.5, and 2 m) and, in consequence, the total density of plants·m⁻² and the percentage of canopy cover, different horizontal continuity levels of the shrub layer were achieved (Figure 2). The voxelized scenarios were converted into Fortran binary file format for FDS (McGrattan *et al.* 2023). This subsection was entirely processed with Python v.3.12.

2.5. Wildfire simulations and analysis

Wildfire simulations were executed with FDS, a Computational Fluid Dynamics Model (McGrattan *et al.* 2023) that requires the following variables to be described:

1. The dimensions of the domain and subdomains and their resolutions (Fig. 3).
2. A vegetation input file describing its bulk density distribution (see Section 2.4).
3. Fuel characteristics describing each vegetation species (bulk density, surface to volume ratio, fuel moisture, geometry and shape of leaves and branches...)
4. Other simulation parameters (wind, slope, etc.)

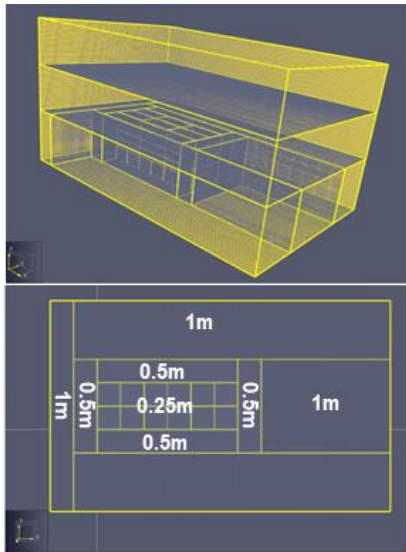


Figure 3: Domain configuration. Overview from PyroSim© 2024.2.1209 (a preprocessor for FDS). The domain was divided in several subdomains with varying resolutions to improve computational efficiency.

Tables 1 and 2 display all the common input parameters and their values (that remained constant) for our simulations. Some of the parameters were found in the literature, others were gathered from field data, and others were inferred based on our preliminary tests.

In total, 11 scenarios of dimensions 20×60 m of monospecific and regularly distributed shrubs of *S. rosmarinus* were tested varying the gap distance between shrubs (0, 0.5, 1, 1.5, and 2 m) and the presence/absence of a *B. retusum* herbaceous layer. Simulation time was set at 150 s. After completion, model outputs were obtained and Smokeview software (Forney 2025) allowed for the visualization of each simulation (Fig. 4).

Table 1: Vegetation fuel parameters.

Variables	Value	Reference
<i>S. rosmarinus</i> dimensions	Height = 0.824 m; Diameters = 1.274 m, 1.116 m	Field data
Herbaceous layer depth	0.21 m	Field data
Bulk density (<i>B. retusum</i>)	BD = 0.86 kg·m ⁻³	Field data
Bulk density (<i>S. rosmarinus</i>)	BD _{leaves} = 0.125 kg·m ⁻³ ; BD _{twigs} = 0.265 kg·m ⁻³	Calculated
Surface to volume ratio (<i>S. rosmarinus</i>)	S:V _{leaves} = 4680 m ⁻¹ ; S:V _{twigs} = 2402.5 m ⁻¹	Papió and Trabaud 1990
Surface to volume ratio (<i>B. retusum</i>)	S:V _{B. retusum} = 3620 m ⁻¹	Sánchez-Pinillos <i>et al.</i> 2021
Fuel moisture content	FMC _{S. rosmarinus} = 45 %; FMC _{B. retusum} = 20 %	Field data; Santana <i>et al.</i> 2011

Table 2: Simulation and methodological parameters.

Variable	Value	Reference
Constant wind	5.3 ms ⁻¹	Based on wildfire records
Slope	0°	-
Ignition line dimensions	5×20 m	Based on our pre-test simulations
Initial HRR	534 kW	Based on our pre-test simulations
Simulation time	150 s	Based on our pre-test simulations
Time for wind development (prior to ignition)	25 s	Based on our pre-test simulations

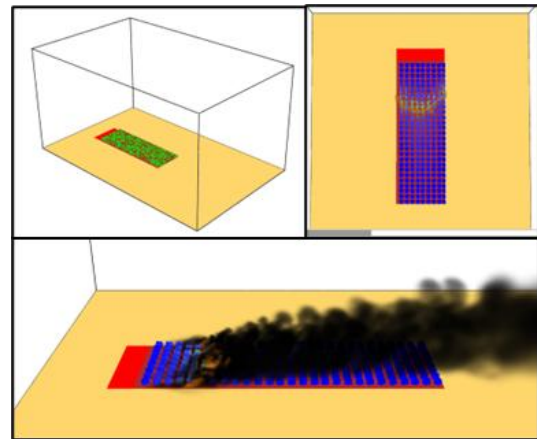


Figure 4: Visualization of one of the simulations with Smokeview, the visualization tool of FDS.

For the analysis of the results, the evolution graphs of the following model output variables were studied: the rate of spread (RoS), the heat release rate (HRR), the mass loss rate (MLR), and the percentage of total burnt dry biomass (%TBDB). The average HRR and MLR values were calculated during the steady-state phase of

the fire. The average RoS value for each scenario was obtained from the RoS of three longitudinal profiles (strips 3 m wide in the x direction and 60 m long in the y direction). The position of the fire front was measured in the profiles, which were uniformly distributed to generate a representative sample and reduce the scenario edge effect. The RoS was calculated as the slope of the curve fitted to this relationship.

3. Results and discussion

Among the 11 simulations executed, 7 of them showed a sustained fire spread (we will call them “Successful” from now on) while the other 4 did not. Thus, output variables are analyzed only for the “Successful” simulations (Table 3). In particular, those scenarios composed of both a shrub layer and an herbaceous layer met the necessary conditions for fire spread, whereas scenarios lacking a continuous herbaceous layer were unable to sustain the fire. The only scenario that could hold the fire without any herbaceous layer is the one with 0 m gap distance, given that the shrub crowns were close enough to transmit the heat. As the gap distance increases, it is more difficult for the heat to be transmitted and for a sustained fire to spread. It is important to note that even though the 0-m-gap-distance scenario could sustain a fire, the HRR decreases progressively until reaching a 0 kW value (Fig. 5), which means that the *S. rosmarinus* shrub layer is not the main driver of the fire due partly to its intrinsic characteristics (bulk density, and surface to volume ratio). The *B. retusum* herbaceous layer is indeed the main layer that carries the fire spread in our simulations, which highlights the important role of continuous flammable fuel beds (Loudermilk *et al.* 2012). Higher values of HRR were obtained for the scenarios that presented a sustained fire and that had higher densities of fuel, for example, the 0-m- and the 0.5-m-gap scenarios (HRR = 163,044, HRR = 118,960 kW). In these cases, the greater accumulation of fuel and the closer distance between *S. rosmarinus* individuals allowed for a high production of energy and feedback during its thermal degradation, thus maintaining the combustion process.

Table 3: Results for sustained fire scenarios (ShL = shrub layer, HL = herbaceous layer, TBDB = total burnt dry biomass, MLR = Mass Loss Rate, HRR = Heat Release Rate, RoS = Rate of Spread, %CC = %Canopy Cover).

Gap (m)	ShL (%CC)	HL (%CC)	TBDB (%)	MLR (kg·s ⁻¹)	Mean HRR (kw)	RoS (m·min ⁻¹)
-	0	100	-	-	64,274	
0	82	0	60.07	3.48 /1.90	54,103	39.60
0	82	100	99.09	8.54	163,044	55.66
0.5	42	100	97.91	6.4	118,960	60.23
1	26	100	85.13	4.56	79,714	50.74
1.5	17	100	74.44	3.73	63,922	48.84
2	12	100	76.02	3.92	66,656	52.65

Regarding the proportion of biomass consumed (consumability), higher percentages of burnt dry biomass were found in denser and more continuous scenarios of shrub+herbaceous layer (0 m and 0.5 m), where all the

vegetation was mostly burnt (>97%) (Table 3 and Fig. 6). An increase in discontinuity within the shrub layer was associated with a reduction in fire propagation, HRR, and overall fuel consumption. MLR values also show this evidence, and the highest values are found again in the 0 m and 0.5 m scenarios.

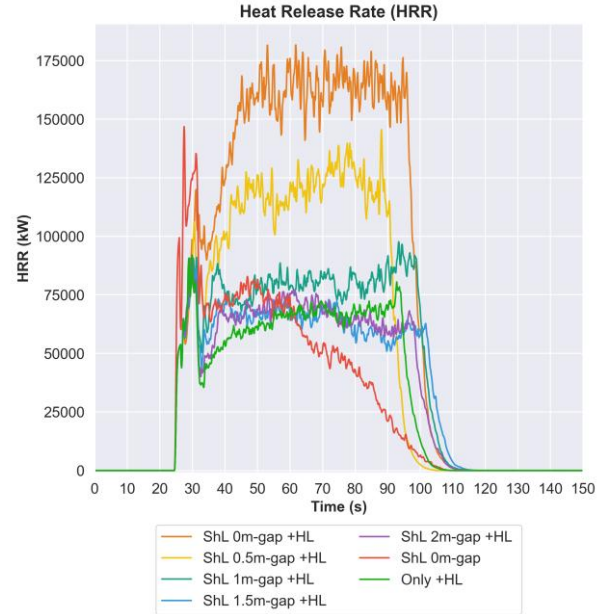


Figure 5: Evolution graph of HRR of each “Successful” scenario (ShL = shrub layer, +HL = presence of herbaceous layer).

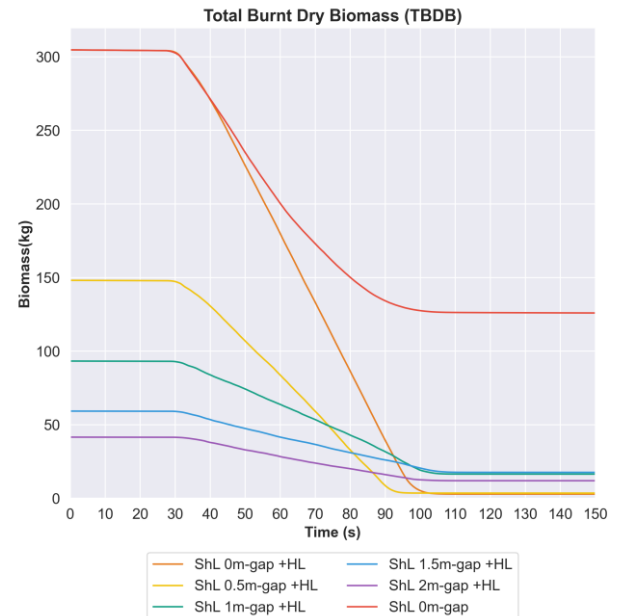


Figure 6: Evolution graph of burnt shrub biomass in each scenario with presence of shrubs (ShL = Shrub layer, +HL = presence of herbaceous layer). The graph shows how the initial amount of biomass decreases as it is consumed by the fire.

Considering the RoS, scenarios with *B. retusum* layer did not show significant differences, and a clear causal relationship cannot be inferred from the results. The highest RoS is developed in the 0.5-m-gap scenario, and the lowest in the 1.5 m gap. On one hand, it could be

expected that as the canopy gap size increased, the wind flows could penetrate between the vegetation, increasing the RoS. On the other hand, scenarios with higher horizontal continuity (and fewer gaps) could also develop higher RoS due to their homogeneity in the fuel layer (Atchley *et al.* 2021). However, this behavior does not appear clear in our results. The biggest difference in RoS is found between the 0-m-gap-non-herbaceous-layer scenario and the 0-m-gap + herb-layer scenario.

4. Conclusions

After conducting the analysis and discussion of the results, the following conclusions can be drawn. First, the methodology followed allows for a good integration of TLS into wildfire simulations, thus enhancing the detail of forest structure in our semi-real scenarios. Second, fire propagation shows sensitivity to changes in the horizontal continuity of the vegetation strata (shrub and herbaceous layers), which significantly influence fire behavior, and this is clearly reflected in the simulations. In any case, a continuous fuel layer is needed for the development of a steady and sustained fire, being the herbaceous layer the main driver in our simulation study.

Higher continuity results in more intense fire behavior and outreach, as it enables the combustion of a greater proportion of available biomass. Third, it is important to note that the results obtained are specific to the simulated conditions, and threshold values may vary, for example, under different wind and slope scenarios. Last, this represents the first step within a broader research work, where further inputs such as the inclusion of vertical structure and combination of all forest strata (herbaceous, shrub, and canopy) are required to support more detailed and realistic fire simulations.

Acknowledgements

We acknowledge William Mell (U.S. Forest Service) for his expert guidance and technical support during the use of the Fire Dynamics Simulator model.

This work was supported by (i) PID2020-117808RB-C21/AEI/10.13039/50110001103 and FSE+ “Invierte en tu Futuro” under Grant PRE2021-099526; and (ii) “Programa de Contratos de Acceso de Personal Investigador Doctor” (PAID-10-22) from “Vicerrectorado de Investigación de la Universitat Politècnica de València”.

References

- ANDREWS, P.L., 2014. Current status and future needs of the BehavePlus Fire Modeling System. *International Journal of Wildland Fire*, **23**(1), pp. 21–33. DOI: 10.1071/WF12167
- ATCHLEY, A.L., LINN, R., JONKO, A., HOFFMAN, C., HYMAN, J.D., PIMONT, F., SIEG, C., and MIDDLETON, R.S., 2021. Effects of fuel spatial distribution on wildland fire behaviour. *International Journal of Wildland Fire*, **30**(3), 179. DOI: 10.1071/WF20096
- CLOUDCOMPARE, 2024. CloudCompare (version 2.13.1) [GPL software] (2.10.2 (Zephyrus) Stereo). Open Source Project. Available: <http://www.cloudcompare.org/> [4/20, 2025].
- DRURY, S., 2020. *Fuel Continuity*. In: S. MANZELLO, ed. *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires*. Cham: Springer International Publishing. pp. 1–3. DOI: 10.1007/978-3-319-51727-8_239-1
- FINNEY, M.A., 2006. *An Overview of FlamMap Fire Modeling Capabilities*. In: P.L. ANDREWS and B.W. BUTLER, eds. *Fuels Management—How to Measure Success*. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- FORNEY, G., 2025. Smokeview, A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data Volume I: User's Guide [online]. Gaithersburg, MD. Available: <https://pages.nist.gov/fds-smv/manuals.html> [6/10, 2025].
- ISENBURG, M., 2018. LAStools - Efficient tools for LiDAR processing. (Version 180409). Available: <http://rapidlasso.com/LAStools> [4/20, 2025].
- LINN, R.R., SIEG, C.H., HOFFMAN, C.M., WINTERKAMP, J.L., and MCMILLIN, J.D., 2013. Modeling wind fields and fire propagation following bark beetle outbreaks in spatially-heterogeneous pinyon-juniper woodland fuel complexes. *Agricultural and Forest Meteorology*, **173**, pp. 139–153. DOI: 10.1016/j.agrformet.2012.11.007
- LÓPEZ, A. and LÓPEZ, M., 2019. Los Incendios Forestales en España. Decenio 2006-2015. [online]. Madrid. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/incendios-forestales/estadisticas-datos.html> [12/22, 2023].
- LOUDERMILK, E.L., O'BRIEN, J.J., MITCHELL, R.J., CROPPER, W.P., HIERS, J.K., GRUNWALD, S., GREGO, J., and FERNANDEZ-DIAZ, J.C., 2012. Linking complex forest fuel structure and fire behaviour at fine scales. *International Journal of Wildland Fire*, **21**(7), pp. 882–893. DOI: 10.1071/WF10116
- MCGRATTAN, K., HOSTIKKA, S., FLOYD, J., MCDERMOTT, VANELL, M., and MUELLER, E., 2023. Fire Dynamics Simulator User's Guide [online]. Gaithersburg, MD. Available: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication1019.pdf> [12/22, 2023].
- MELL, W., MCNAMARA, D., FORNEY, G.P., and HOFFMAN, C.M., 2011. Computer modelling of wildland-urban interface fires. *Fire & Materials* [online]. pp. 531–544. Available: <https://www.researchgate.net/publication/267365800> [12/22, 2023].

- MITECO, 2023. Los Incendios Forestales en España: 1 enero - 31 diciembre 2022 (Avance Informativo) [online]. Madrid. Available: <https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/biodiversidad/temas/incendios-forestales/Avance%20informativo%2031%20de%20diciembre%202024.pdf> [02/01, 2024].
- NUNES, L., PASALODOS-TATO, M., ALBERDI, I., SEQUEIRA, A.C., VEGA, J.A., SILVA, V., VIEIRA, P., and REGO, F.C., 2022. Bulk Density of Shrub Types and Tree Crowns to Use with Forest Inventories in the Iberian Peninsula. *Forests*, **13**(4). DOI: 10.3390/f13040555
- PAPIÓ, C. and TRABAUD, L., 1990. Structural characteristics of fuel components of five Mediterranean shrubs. *Forest Ecology and Management*, **35**(3-4), pp. 249-259.
- PAUSAS, J.G. and KEELEY, J.E., 2021. Wildfires and global change. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **19**(7), pp. 387-395. DOI: 10.1002/fee.2359
- SÁNCHEZ-PINILLOS, M., DE CÁCERES, M., CASALS, P., ALVAREZ, A., BELTRÁN, M., PAUSAS, J.G., VAYREDA, J., and COLL, L., 2021. Spatial and temporal variations of overstory and understory fuels in Mediterranean landscapes. *Forest Ecology and Management*, **490**. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.119094
- SANTANA, V.M., BAEZA, M.J., and VALLEJO, V.R., 2011. Fuel structural traits modulating soil temperatures in different species patches of Mediterranean Basin shrublands. *International Journal of Wildland Fire*, **20**(5), pp. 668-677. DOI: 10.1071/WF10083
- SHREVE, B., THIEX, N., and WOLF, M., 2006. National Forage Testing Association Reference Method: Dry Matter by Oven Drying for 3 Hours at 105° C. NFTA Reference Methods. National Forage Testing Association, Omaha, NB. Available: www.foragetesting.org [6/11, 2025].
- SORIANO-SANCHO, J.L. and QUÍLEZ-MORAGA, R., 2017. Análisis de la humedad del combustible vivo en la Comunitat Valenciana. In: SOCIEDAD ESPAÑOLA DE CIENCIAS FORESTALES, ed. 7o Congreso Forestal Español. Plasencia (Cáceres, Extremadura).
- STOVALL, A.E.L., VORSTER, A.G., ANDERSON, R.S., EVANGELISTA, P.H., and SHUGART, H.H., 2017. Non-destructive aboveground biomass estimation of coniferous trees using terrestrial LiDAR. *Remote Sensing of Environment*, **200**, pp. 31-42. DOI: 10.1016/j.rse.2017.08.013.
- TORRALBA, J., CRESPO-PEREMARCH, P., and Ruiz, L.Á., 2018. Assessing the use of discrete, full-waveform LiDAR and TLS to classify Mediterranean forest species composition. *Revista de Teledetección*, **52**, pp. 27-40. DOI: 10.4995/raet.2018.11106.
- TORRALBA, J., CARBONELL-RIVERA, J.P., RUIZ, L.Á., and CRESPO-PEREMARCH, P., 2022. Analyzing TLS Scan Distribution and Point Density for the Estimation of Forest Stand Structural Parameters. *Forests*, **13**(12), 2115. DOI: 10.3390/f13122115.

DETECTION OF OFFSHORE OIL AND GAS PLATFORMS AND ASSOCIATED METHANE EMISSIONS USING SATELLITES

DETECCIÓN EN ALTA MAR USANDO SATÉLITES DE PLATAFORMAS DE PETRÓLEO, GAS Y EMISIONES DE METANO ASOCIADAS

Lulu Si^{a,*}, Shanyu Zhou^a, Itziar Irakulis-Loitxate^a, Javier Roger^a, Javier Gorroño^a, Adriana Valverde^a, Luis Guanter^{a, b}

^a Institute of Water and Environmental Engineering (IIAMA), Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain. , lsi@doctor.upv.es; , szhou1@upv.es; , iiraloi@doctor.upv.es; , jarojua@upv.edu.es; , jagorvie@upv.es; , avaligl@doctor.upv.es; , lguanter@fis.upv.es

^b Environmental Defense Fund, Reguliersgracht 79, 1017 LN Amsterdam, The Netherlands.

How to cite: L. Si, S. Zhou, I. Irakulis-Loitxate, J. Roger, J. Gorroño, A. Valverde y L. Guanter. 2025. Detection of offshore oil and gas platforms and associated methane emissions using satellites. En libro de actas: *Quinto Congreso en Ingeniería Geomática*. Valencia, 2 – 3 de Julio de 2025. <http://dx.doi.org/10.4995/CIGeo2025.2025.19877>

Abstract:

Offshore oil and gas platforms (OOGPs) are key structures used to drill, extract, and process oil and natural gas. Accurate and comprehensive information on the location and operational status of OOGPs is essential for evaluating their potential environmental impacts and formulating effective marine management policies. In this work, several OOGPs and methane emissions are identified spanning long time series with satellite-based imaging spectrometers and SAR instruments. Our findings highlight the potential of satellites to monitor offshore infrastructure and enhance understanding of the marine environmental impacts of OOGPs.

Key words: Offshore platform, Methane emissions, SAR, Remote Sensing

Resumen:

Las plataformas petrolíferas y gasíferas marinas (OOGP) son estructuras clave para la perforación, extracción y procesamiento de petróleo y gas natural. Disponer de información precisa y completa sobre la ubicación y el estado operativo de las OOGP es esencial para evaluar su posible impacto ambiental y formular políticas eficaces de gestión marina. En este trabajo, se identifican varias OOGP y sus emisiones de metano a lo largo de largas series temporales mediante espectrómetros de imágenes satelitales e instrumentos SAR. Nuestros hallazgos resaltan el potencial de los satélites para monitorear la infraestructura marina y mejorar la comprensión de los impactos ambientales marinos de las OOGP.

Palabras clave: Plataforma marina, Emisiones de metano, SAR, Teledetección

1. Introduction

Offshore oil and gas platforms (OOGPs) are critical infrastructure for global fossil fuel supply, with over 12,000 active installations worldwide, which produce nearly 30% of the world's oil (Tan *et al.* 2021; EIA 2016). However, their remote locations and lack of accurate and updated public geolocation data make their effective identification challenging. Traditional monitoring approaches are often limited in spatial coverage and update frequency, especially in offshore regions. In this context, satellite-based remote sensing has emerged as a powerful solution to detect and monitor OOGPs and their environmental impacts (Spanier and Kuenzer 2024).

The Sentinel-1 satellite, operated by the European Space Agency (ESA), provides C-band synthetic aperture radar (SAR) imagery that is well-suited for identifying offshore platforms. Its ability to operate under all weather conditions and during both day and night makes it an ideal tool for continuous offshore infrastructure monitoring. Recent advances in object detection have enabled automated identification of OOGPs in SAR imagery, allowing for frequent updates of OOGP inventories in large offshore areas (Falqueto *et al.* 2019; Wong *et al.* 2019).

Beyond infrastructure detection, the environmental footprint of OOGPs—particularly methane (CH₄) emissions—is a growing concern. Methane is a potent greenhouse gas, with a 20-year global warming potential 84 times that of CO₂, and oil and gas operations account for nearly 30% of anthropogenic CH₄ emissions globally

* Corresponding Author: Lulu Si, lsi@doctor.upv.es

(Wulder *et al.* 2019; Myhre *et al.* 2013). These emissions often occur through unintentional leaks or venting and are difficult to monitor using ground-based approaches in remote offshore regions (Irakulis-Loitxate *et al.* 2022).

To address this gap, we use Environmental Mapping and Analysis Program (EnMAP) hyperspectral remote sensing imagery (Guanter *et al.* 2015), which can resolve narrow spectral absorption features of methane in the shortwave infrared (SWIR) region. This instrument enables precise plume detection and concentration retrieval from space, offering an independent and quantifiable method for emissions monitoring (Guanter *et al.* 2015).

This study presents an integrated remote sensing strategy that combines Sentinel-1 SAR-based OOGP detection with hyperspectral methane emission mapping. By spatially cross-referencing methane plume locations with verified OOGP sites, we improve source attribution accuracy and reduce false detections. This cross-validation approach not only strengthens scientific support in spaceborne methane retrievals but also supports regulatory bodies and environmental agencies in prioritizing inspections and enforcement efforts.

2. Dataset and methodology

This study investigates OOGPs and their associated methane emissions in the Gulf of Thailand by integrating multi-source satellite observations. Two types of remote sensing data were employed: Sentinel-1 SAR data for detecting offshore platforms and hyperspectral data from EnMAP for identifying methane emission plumes as point sources. Our method can be applied to other regions, supporting global OOGPs and methane monitoring initiatives.

2.1. Data Sources

Sentinel-1 is a dual-polarization SAR mission operated by the ESA, offering high-resolution, weather-independent imagery (ESA 2017). We used VH-polarized SAR images due to their sensitivity to surface structures and ability to distinguish man-made targets from natural ocean clutter. The high revisit frequency of Sentinel-1 ensures temporal consistency and improves detection reliability. The SAR data's ability to penetrate clouds and operate day and night makes it especially advantageous for monitoring offshore structures in offshore regions, where persistent cloud cover is common.

For methane detection, we utilized hyperspectral imagery from EnMAP. This instrument provides hundreds of narrow bands in the SWIR spectrum, especially around 2.3 μm , where methane exhibits strong absorption features (Roger *et al.* 2024). This spectral richness makes it particularly suitable for trace gas retrievals.

Both datasets complement each other in terms of spatial resolution and spectral coverage, enhancing detection sensitivity and enabling cross-validation of methane plume identification.

2.2. Detection of OOGPs and methane emission

The OOGP detection method is based on the stable backscatter behavior of offshore structures in time series SAR images. We developed a detection framework based on an adaptive threshold method and morphological operation, which identifies persistent, high-intensity signals while removing dynamic ocean noise. This method assumes that offshore platforms produce stable radar signatures over time. The entire processing workflow was developed on the Google Earth Engine (GEE) platform and Python scripts for post-processing and visualization. In addition, temporal composites, describe as Occurance Frequency, were generated to reduce false positives caused by transient phenomena such as ships or waves.

For methane emission detection, we adopted the matched filter method (Roger *et al.* 2024) applied to EnMAP data. This method enhances the spectral contrast between methane and the background by applying a predefined spectral template across the image, and provides the methane concentration enhancement retrieval map as a result. The technique is particularly effective in hyperspectral data, where fine spectral resolution allows precise isolation of methane's absorption features. Methane emissions were monitored as point sources, focusing on localized plumes typically originating from individual offshore platforms. Once the plumes are identified, their shape is defined to estimate the amount of methane in the plume, and combined with the wind speed data, we estimate the emission flux rate.

The integration of platform detection and methane plume retrieval enabled spatial cross-validation, where methane point-source emissions detected near confirmed OOGP locations were used as evidence to further validate the detection results. This combined approach enhances the accuracy of both infrastructure identification and emission monitoring in offshore environments, providing a robust framework for environmental assessment and regulatory compliance monitoring.

2.3. Validation of detection

To comprehensively assess the performance of our OOGP dataset, the detected platforms were cross-validated using multiple reference sources, including the OGIM database (Omara *et al.* 2023), high-resolution Sentinel-2 RGB imagery, and Google Earth for detailed visual interpretation and internal review. In addition, the detected methane plumes were confirmed by pinpointing their emission sources using high-resolution satellite images.

3. Results

3.1. Offshore Oil and Gas Platform Detection

Using Sentinel-1 VH-polarized SAR imagery and the adaptive thresholding detection framework described in Section 2.2, we identified a total of 634 OOGPs within the study area in the Gulf of Thailand. The detected platforms exhibit consistent and stable backscatter signals across monthly composites, confirming their

persistence as man-made structures. Spatial distribution analysis shows that most platforms cluster around known hydrocarbon extraction zones, matching well with existing OOGP registries and industry reports.

Temporal analysis further demonstrated the robustness of the detection method, with recall rates above 5% in 2023. False positives, mainly caused by transient vessels or oceanic phenomena, were effectively reduced through morphological filtering and temporal consistency checks. The platform detection results form a reliable input for subsequent methane emission analysis. Figure 1 shows the comparison of the OOGPs map and OGIM production in 2023, which indicates our detection has higher spatial coverage. Based on spatial analysis within the nearest neighbour distance of 10 m, Figure 2 indicates that our detection has a high degree of consistency in spatial location with the OGIM products.

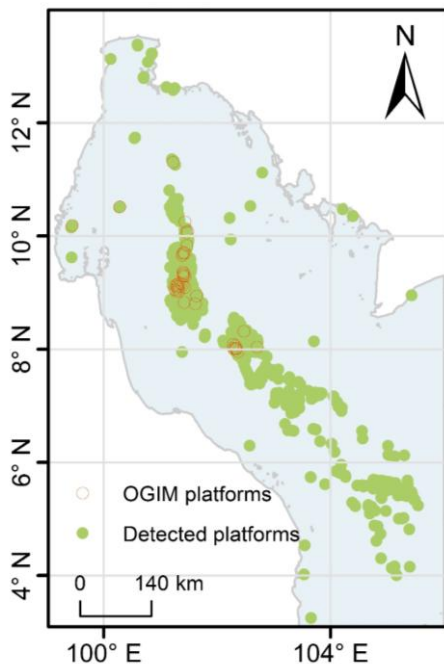


Figure 1: Comparison of the OOGPs map and OGIM production in 2023. Green points represent OOGPs detected by Sentinel-1. The red points indicate the referenced production from OGIM.

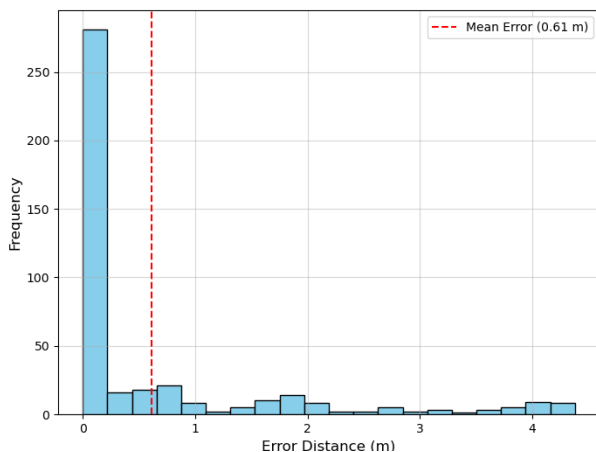


Figure 2: The spatial deviation between the detection platforms and verification data was quantified by calculating the error distance between the matching points.

3.2. Methane Point-Source Plume Detection and Emission Quantification

Hyperspectral imagery from EnMAP was processed using the matched filter method to detect localized methane plumes associated with individual offshore platforms. We detect a plume in the Gulf of Thailand with EnMAP on the 26 October 2024 (Fig. 3).

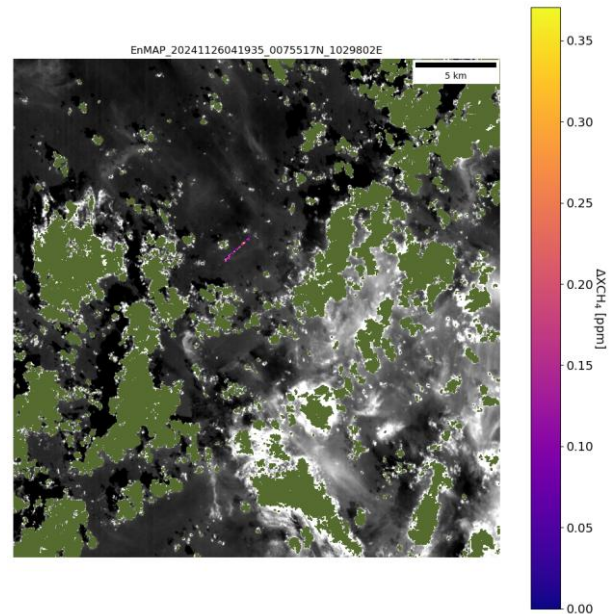


Figure 3: Methane emissions from OOGP in the Gulf of Thailand detected by EnMAP on 26 October 2024.

Emission quantification was performed using the hyperspectral data. The estimated methane emission flux rate was 7 ± 3 t/h.

3.3. Cross-Validation of Platform and Methane Emission Detections

To evaluate the accuracy and effectiveness of our integrated detection approach, we performed spatial cross-validation between the OOGP locations and detected methane plumes (Fig. 4). On the one hand, OOGPs with methane emissions strongly support their attribution to OOGP-related emissions. On the other hand, platforms without nearby methane plumes were examined to assess potential non-emitting or below-detection-threshold sources. This two-way validation reduces false positives in both platform identification and emission detection. The cross-validation process enhances the reliability of the remote sensing-based monitoring framework and simultaneously facilitates the identification of critical emitters for targeted regulatory actions.

4. Conclusions

This study demonstrates the effectiveness of a satellite-based remote sensing approach for detecting OOGPs and attributing associated methane point-source emissions in the Gulf of Thailand. By integrating Sentinel-1 SAR imagery with hyperspectral data from EnMAP, we developed a comprehensive framework capable of both infrastructure mapping and environmental impact assessment.

The platform detection results reveal clear spatial distribution patterns of OOGPs, aligning closely with known hydrocarbon extraction zones. The use of SAR imagery ensures robust detection across varying weather conditions and temporal spans, highlighting the scalability and reliability of this method for monitoring offshore infrastructure globally.

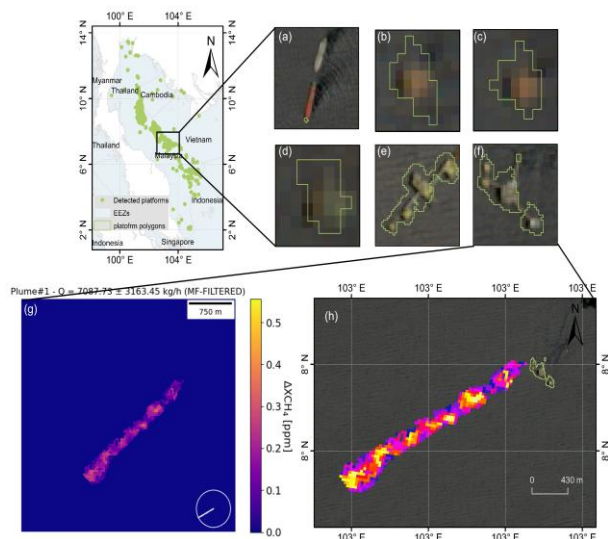


Figure 4: Maps of detected OOGPs and the methane plume in 2023. a-f) Selected OOGPs extraction examples. Sentinel-2 RGB images were used as the basemap; g, h) show a methane emission detected by EnMAP on 26 October 2024.

Simultaneously, hyperspectral remote sensing enabled the identification and quantification of methane plumes

as localized point sources. The application of the matched filter technique allowed precise detection of methane absorption features, leading to accurate plume mapping and emission rate estimation. Most importantly, the spatial cross-validation between methane plumes and confirmed OOGP locations provided strong evidence for source attribution, reducing false detections.

These findings underscore the significant environmental implications of offshore fossil fuel operations. The ability to independently monitor and quantify methane emissions from space offers a powerful tool for environmental governance, especially in remote or under-monitored maritime regions. Our integrated approach provides actionable insights for regulatory agencies, supports compliance verification.

In conclusion, this study highlights the critical role of satellite remote sensing in bridging observational gaps in offshore environmental monitoring. The presented methodology is transferable to other regions, offering a scalable and transparent solution for tracking the climate impacts of offshore oil and gas infrastructure.

Acknowledgements

The authors thank the Copernicus Programme of the European Space Agency for the free provision of Sentinel-1 data, and the Google Earth Engine platform for enabling efficient data preprocessing and access. We also express our sincere appreciation to the DLR Space Agency, Germany, Environmental Mapping and Analysis Program (EnMAP) data used in this work, respectively.

References

- EIA, 2016. US Energy Information Administration. Today in energy. Available: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=28492>. [6/30, 2025].
- ESA, 2017. European Space Agency. Instrument user guides. Available: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/userguides> [6/14, 2017].
- FALQUETO, L.E., SÁ, J.A.S., PAES, R.L. and PASSARO, A., 2019. Oil Rig Recognition Using Convolutional Neural Network on Sentinel-1 SAR Images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **16**, pp. 1329–1333. DOI: 10.1109/LGRS.2019.2894845
- GUANTER, L., KAUFMANN, H., SEGL, K., FOERSTER, S., ROGASS, C., CHABRILLAT, S., KUESTER, T., HOLLSTEIN, A., ROSSNER, G., CHLEBEK, C., STRAIF, C., FISCHER, S., SCHRADER, S., STORCH, T., HEIDEN, U., MUELLER, A., BACHMANN, M., MÜHLE, H., MÜLLER, R., HABERMAYER, M., OHNDORF, A., HILL, J., BUDDENBAUM, H., HOSTERT, P., VAN DER LINDEN, S., LEITÃO, P.J., RABE, A., DOERFFER, R., KRAEMANN, H., XI, H., MAUSER, W., HANK, T., LOCHERER, M., RAST, M., STAENZ, K. and SANG, B., 2015. The EnMAP spaceborne imaging spectroscopy mission for Earth observation. *Remote Sensing*, **7**(7), pp. 8830–8857. DOI: 10.3390/rs70708830
- IRAKULIS-LOITXATE, I., GORROÑO, J., ZAVALA-ARAIZA, D. and GUANTER, L., 2022. Satellites detect a methane ultra-emission event from an offshore platform in the Gulf of Mexico. *Environmental Science & Technology Letters*, **9**(7), pp. 520–525. DOI: 10.1021/acs.estlett.2c00225
- MYHRE, G., SHINDELL, D., BRÉON, F.M., COLLINS, W., FUGLESTVEDT, J., HUANG, J., KOCH, D., LAMARQUE, J.F., LEE, D. and MENDOZA, B., 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. and Midgley, P.M., eds. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, pp.659–740.
- OMARA, M., GAUTAM, R., O'BRIEN, M.A., HIMMELBERGER, A., FRANCO, A., MEISENHEDER, K., HAUSER, G., LYON, D.R., CHULAKADABBA, A., MILLER, C.C., FRANKLIN, J., WOFSEY, S.C. and HAMBURG, S.P., 2023. Developing a spatially explicit global oil and gas infrastructure database for characterizing methane emission sources at high resolution. *Earth System Science Data*, **15**, pp. 3761–3790. DOI: 10.5194/essd-15-3761-2023

- ROGER, J., IRAKULIS-LOITXATE, I., VALVERDE, A., GORROÑO, J., CHABRILLAT, S., BRELL, M. and GUANTER, L., 2024. High-resolution methane mapping with the EnMAP satellite imaging spectroscopy mission. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **62**, pp. 1-12.
- SPANIER, R. AND KUENZER, C., 2024. Marine infrastructure detection with satellite data—A review. *Remote Sensing*, **16**(10), 1675. DOI: 10.3390/rs16101675
- TAN, Y., LI, H.X., CHENG, J.C.P., WANG, J., JIANG, B., SONG, Y. and WANG, X., 2021. Cost and environmental impact estimation methodology and potential impact factors in offshore oil and gas platform decommissioning: A review. *Environmental Impact Assessment Review*, **87**, pp.106536–106536. DOI: 10.1016/j.eiar.2020.106536, 2021
- WONG, B.A., THOMAS, C. and HALPIN, P., 2019. Automating offshore infrastructure extractions using synthetic aperture radar & Google Earth Engine. *Remote Sensing of Environment*, **233**, 111412. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111412, 2019
- WULDER, M.A., LOVELAND, T.R., ROY, D.P., CRAWFORD, C.J., MASEK, J.G., WOODCOCK, C.E., ALLEN, R.G., ANDERSON, M.C., BELWARD, A.S. and COHEN, W.B., 2019. Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*, **225**, pp. 127–147. DOI: 10.1016/j.rse.2019.02.015

EVALUACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DEL ESTADO TRÓFICO Y ECOLÓGICO DE LA ALBUFERA DE VALENCIA MEDIANTE TELEDETECCIÓN

SPATIO-TEMPORAL ASSESSMENT OF THE TROPIC AND ECOLOGICAL STATUS OF THE ALBUFERA OF VALENCIA USING REMOTE SENSING

Lisette Sánchez-Pérez^{a,*}, Xavier Sòria-Perpinyà^a, Vicente Caselles^b, Jesús Delegido^a

^a Image Processing Laboratory (IPL), Universitat de València, Paterna, 46980, España. , lisgasan@alumni.uv.es; , javier.soria-perpina@uv.es; , jesus.delegido@uv.es

^b Departamento de Termodinámica, Facultad de Física, Universitat de València, Burjassot, 46100 España. , vicente.caselles@uv.es

How to cite: L. Sánchez-Pérez, X. Sòria-Perpinyà, V. Caselles y J. Delegido. 2025. Evaluación espacio-temporal del estado trófico y ecológico de la Albufera de Valencia mediante teledetección. En libro de actas: *Quinto Congreso en Ingeniería Geomática*. Valencia, 2 – 3 de Julio de 2025. <http://dx.doi.org/10.4995/CIGeo2025.2025.19893>

Resumen:

La Albufera de Valencia es el lago oligohalino más extenso de España, posee un alto valor ecológico y alberga una variada biodiversidad. No obstante, se encuentra sometida a intensos procesos de eutrofización derivados de la actividad antropogénica. La misión Landsat, en operación continua desde 1972, constituye una de las series más extensas de observación terrestre. A partir de 1982, con la incorporación de sensores multispectrales de 30 metros de resolución espacial en Landsat 4, esta misión se ha consolidado como una herramienta esencial para el análisis multitemporal de ecosistemas acuáticos. El presente estudio tuvo como objetivo principal determinar la calidad del agua y evaluar los estados trófico y ecológico de la Albufera mediante el uso de imágenes satelitales de Landsat 7 y Landsat 8. Entre los objetivos específicos se contempló el desarrollo de algoritmos para la estimación de clorofila-a, transparencia (disco de Secchi) y sólidos en suspensión. Asimismo, se generaron mapas temáticos y se llevó a cabo un análisis temporal de los cambios registrados en el cuerpo de agua. Para ello, se integraron datos de campo provenientes del Programa de Seguimiento de Zonas Húmedas con imágenes satelitales procesadas. Los algoritmos desarrollados permitieron correlacionar valores espectrales con mediciones *in situ* y facilitaron una estimación precisa de los parámetros de calidad del agua. Los mapas temáticos derivados de estas estimaciones posibilitaron una evaluación detallada tanto espacial como temporal. Los resultados evidenciaron un comportamiento periódico en la calidad del agua, con máximos de concentración de clorofila-a y una disminución en la transparencia atribuible al incremento de sólidos en suspensión. Los algoritmos mostraron un desempeño estadísticamente robusto (R^2 entre 0.74 y 0.93), y los mapas generados permitieron identificar las zonas más afectadas. En todos los años analizados, la Albufera presentó un estado hipertrófico persistente y un estado ecológico clasificado como “malo”, conforme a los criterios normativos vigentes.

Palabras clave: Clorofila-a, Sólidos en suspensión, Disco de Secchi, Landsat, Albufera

Abstract:

La Albufera de Valencia, Spain's most extensive oligohaline lake, possesses significant ecological value and harbors diverse biodiversity. However, it is currently subjected to intense eutrophication processes primarily stemming from anthropogenic activities. The Landsat mission, in continuous operation since 1972, represents one of the most comprehensive series of Earth observation. With the incorporation of multispectral sensors boasting 30-meter spatial resolution on Landsat 4 in 1982, this mission has solidified its position as an essential tool for the multitemporal analysis of aquatic ecosystems. The primary objective of the present study was to determine water quality and evaluate the trophic and ecological status of La Albufera using Landsat 7 and Landsat 8 satellite imagery. Specific objectives included the development of algorithms for estimating chlorophyll-a, transparency (Secchi disk depth), and suspended solids. Furthermore, thematic maps were generated, and a temporal analysis of changes observed in the water body was conducted. To achieve this, field data from the Wetland Monitoring Program were integrated with processed satellite images. The developed algorithms enabled the correlation of spectral values with in-situ measurements, facilitating accurate estimation of water quality parameters. The thematic maps derived from these estimations allowed for a detailed spatial and temporal assessment. The results revealed a periodic behaviour in water quality, with peak chlorophyll-a concentrations and a decrease in transparency attributed to increased suspended solids. The algorithms demonstrated statistically robust performance (R^2 between 0.74 and 0.93), and the generated maps enabled the

* Corresponding Author: Lisette Sánchez-Pérez, lisgasan@alumni.uv.es

identification of the most affected areas. Across all analyzed years, La Albufera consistently exhibited a persistent hypertrophic state and an ecological status classified as "poor," in accordance with current regulatory criteria.

Key words: Chlorophyll-a, Suspended solids, Secchi disk, Landsat, Albufera

1. Introducción

La eutrofización es un proceso natural de degradación ambiental que afecta a los ecosistemas acuáticos, especialmente a cuerpos de agua lénticos como lagunas y lagos (Ledesma *et al.* 2013). Sin embargo, este fenómeno se ha intensificado debido a actividades humanas, provocando un enriquecimiento excesivo de nutrientes que favorece el crecimiento de fitoplancton y genera alteraciones profundas en la calidad del agua y el equilibrio ecológico (Moreno *et al.* 2010). Entre sus efectos más relevantes se encuentran la pérdida de biodiversidad, la desaparición de macrófitos sumergidos y el aumento de la turbidez, factores que limitan la funcionalidad ecológica de estos sistemas (Moreno *et al.* 2010).

El lago de la Albufera de Valencia, situado en la costa oriental de España (Fig. 1), es un ecosistema sometido a intensas presiones antrópicas. A pesar de su categoría de conservación, como su designación como Parque Natural en los años 80 y su inclusión en convenios internacionales de protección, desde los años 60 hasta la actualidad ha sufrido un proceso continuo de deterioro, con fuertes evidencias de eutrofización avanzada (Martín *et al.* 2013; Mondría 2010). Esta situación ha generado una creciente preocupación por la conservación de su estado ecológico y la necesidad de establecer mecanismos de monitoreo ambiental eficaces y continuos.

Frente a esta necesidad, la teledetección satelital se presenta como una herramienta muy útil para el seguimiento de la calidad del agua. Esta permite la estimación de parámetros clave como la concentración de clorofila-a (Chl-a), los sólidos en suspensión (TSS) y la transparencia mediante el uso de imágenes multispectrales y el desarrollo de algoritmos específicos (Chuvienco 2008). Esta metodología complementa los métodos tradicionales de muestreo *in situ*, ofreciendo mayor cobertura y una visión integral del comportamiento ambiental de las masas de agua (Gholizadeh *et al.* 2016).

El presente estudio tiene como objetivo principal realizar un análisis temporal del estado trófico y ecológico de la Laguna Albufera de Valencia entre los años 2013 y 2020, utilizando técnicas de teledetección. Para ello, se desarrollaron y validaron algoritmos a partir de imágenes satelitales Landsat 7 y 8, que permitan estimar con precisión los parámetros indicativos del proceso de eutrofización. Los resultados obtenidos se interpretaron bajo los criterios establecidos por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) y la Directiva Marco del Agua (DMA), con el fin de identificar tendencias y patrones temporales que permitan la gestión y conservación de este medio natural.

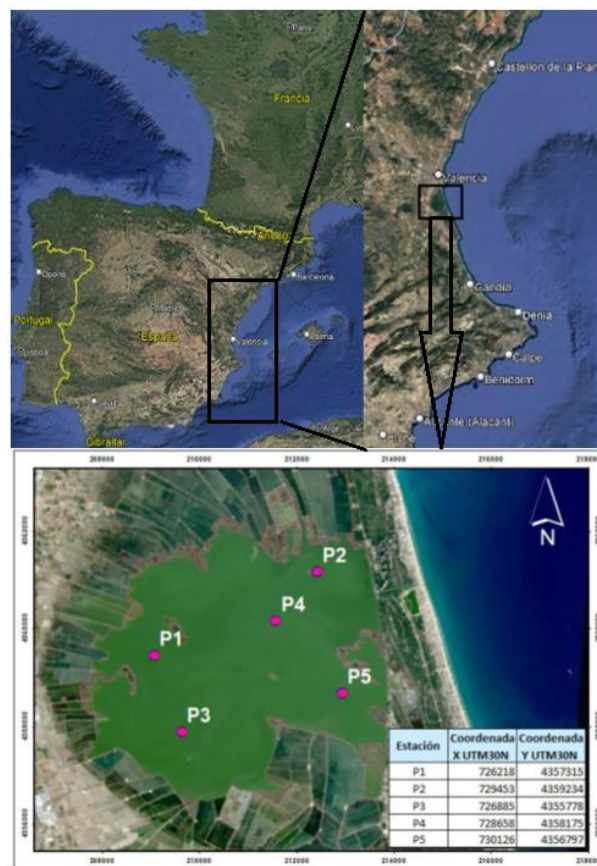


Figura 1: Zona de estudio, Albufera de Valencia y localización de las estaciones de muestreo IZONASH. Coordenadas en sistema UTM huso 30N, datum WGS 84.

2. Materiales y Métodos

2.1. Área de estudio

La Albufera de Valencia es una laguna costera de agua dulce situada a unos 10 km al sur de la ciudad de Valencia, en la costa este de la península ibérica. Forma parte del Parque Natural L'Albufera desde 1986 y abarca unas 21120 ha, de las cuales aproximadamente 2500 ha corresponden al cuerpo de agua. Con una altitud media de 1 m y una profundidad entre 0.8 y 1.2 m, está rodeada de arrozales y vegetación palustre (Martín *et al.* 2013; Romo *et al.* 2008).

Se formó tras el aislamiento progresivo de un antiguo golfo marino por un cordón litoral (Dehesa del Saler) y recibe aportes de agua dulce desde acequias, barrancos y surgencias subterráneas (*ullals*). Su dinámica hidrológica está ligada al cultivo de arroz y al manejo de tres canales de desagüe (*golas*) que conectan con el mar Mediterráneo (Doña *et al.* 2011).

A pesar de su alto valor ecológico y de estar incluida en la lista de humedales de importancia internacional (Convenio RAMSAR) y como Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA), la laguna ha sufrido

un proceso continuo de degradación desde mediados del siglo XX (Martín *et al.* 2013; Mondría 2010). Este deterioro ha sido causado principalmente por la descarga de aguas residuales urbanas e industriales, el uso intensivo de fertilizantes y pesticidas en las áreas agrícolas circundantes, y la presión del desarrollo urbano y turístico (Pitarch *et al.* 2017).

Actualmente, la Albufera presenta características propias de un sistema hipertrófico, con alta concentración de nutrientes, proliferación de cianobacterias y escasa transparencia del agua. Esta situación plantea importantes retos para su gestión y conservación, requiriendo herramientas de monitoreo ambiental que permitan evaluar su estado de manera continua, precisa y rentable (Pitarch *et al.* 2017; Urrego *et al.* 2018).

2.2. Metodología

La investigación se estructuró en distintas fases, en las cuales se integraron datos satelitales, mediciones *in situ* y técnicas de análisis estadístico y cartográfico, para abordar de forma integral la evaluación de la calidad del agua. En primer lugar, se recopilaron datos físicos y biológicos, obtenidos *in situ* a través del Programa de Seguimiento de Zonas Húmedas (IZONASH), gestionado por la Generalitat Valenciana. Este programa proporciona mediciones mensuales de concentraciones de clorofila-a, sólidos en suspensión y transparencia medida como la profundidad del disco de Secchi (SD), en cinco estaciones de muestreo debidamente georreferenciadas (Fig. 1). Estos datos distribuidos a lo largo del periodo de estudio fueron empleados para la calibración y validación de los algoritmos espectrales desarrollados.

2.2.1. Adquisición y preprocesamiento de imágenes

Las imágenes utilizadas correspondieron a los satélites Landsat 7 (ETM+) y Landsat 8 (OLI/TIRS), que integran una constelación de nueve satélites gestionados por el United States Geological Survey (USGS), y dedicados a la observación de la superficie terrestre. Ambos satélites operan en órbita heliosíncrona a 705 km de altitud y poseen una resolución espacial de 30 m para las bandas ópticas, con un ciclo de revisita de 16 días, lo que permite un seguimiento temporal regular de fenómenos ambientales (Ariza 2013; USGS 2025).

Landsat 7, lanzado en 1999 cuenta con siete bandas espectrales y una banda pancromática de 15 m de resolución espacial. Pero desde mayo de 2003 sus imágenes presentan un problema de bandeo debido a un fallo en el Scan Line Corrector (SLC-off), lo que genera ausencia de datos que puede ser corregido mediante interpolación (Fernández and Herrero 2001; Liang 2018). Por su parte, Landsat 8, que órbita desde el 11 de febrero de 2013, incorpora dos sensores: el OLI (Operational Land Imager), con nueve bandas espectrales (dos más que versiones anteriores), y el TIRS (Thermal Infrared Sensor) con dos bandas en el infrarrojo térmico (Liang 2018).

Las imágenes utilizadas se descargaron de la plataforma de USGS, se seleccionaron escenas con una cobertura nubosa inferior al 20% y con fechas coincidentes a las campañas de campo, admitiéndose

un desfase máximo de tres días, lo cual se considera aceptable según estudios previos (Briceño *et al.* 2018; Schröder *et al.* 2024).

En este estudio se utilizaron imágenes de nivel 1 (Level-1), es decir, datos de reflectividad *top-of-atmosphere* (TOA), por lo cual es necesario aplicar una corrección atmosférica. Si bien Landsat (Collection 2) ofrece productos de reflectividad superficial, estos algoritmos están diseñados principalmente para superficies terrestres y no garantizan la precisión requerida en ambientes acuáticos.

Esta precisión es importante porque en ambientes acuáticos los niveles de reflectividad del agua son muy bajos, y por tanto altamente sensibles a errores en la corrección atmosférica. Por ello, la aplicación de correctores atmosféricos específicos para aguas permite obtener valores espectrales más fiables, lo cual es fundamental para la estimación precisa de parámetros de evaluación de calidad del agua (Zhu and Xia 2023).

Todas las imágenes fueron sometidas al proceso de corrección atmosférica en el software ENVI 5.3, con la herramienta Dark Subtract. Esta herramienta implementa el método de Dark Object Subtraction (DOS), una técnica empírica ampliamente empleada en estudios de teledetección que se basa en la identificación de píxeles oscuros dentro de la imagen para estimar y substraer la contribución de la bruma atmosférica (Gilmore *et al.* 2015).

Seguidamente, se utilizó el índice NDWI (Normalized Difference Water Index) con el objetivo de delimitar la masa de agua, generando máscaras precisas que aislaran los píxeles correspondientes exclusivamente a la superficie de la laguna (Vasanthi and Joshitha 2024).

2.2.2. Desarrollo y validación de algoritmos

Para el desarrollo de los algoritmos empíricos de estimación, se seleccionaron los datos de campo correspondientes al año 2014, por su óptima coincidencia entre fechas satelitales y las campañas de muestreo. Mientras que los datos de los años restantes se reservaron para el proceso de validación.

Se utilizaron índices espectrales y combinaciones de bandas del sensor para establecer relaciones entre las medidas *in situ* y las reflectividades de las bandas espectrales. Posteriormente, se seleccionaron las ecuaciones de ajuste que presentaron los mejores coeficientes de determinación (R^2), y el algoritmo con el mayor desempeño fue aplicado al conjunto de imágenes previamente seleccionadas.

La validación de los algoritmos planteados se realizó utilizando los datos *in situ* correspondientes a los años 2013 a 2020, excluyendo el año 2014 para evitar sobreajustes. Este proceso consistió en establecer correlaciones lineales entre los valores observados en campo y los valores estimados a partir de los mapas generados mediante la aplicación del algoritmo seleccionado.

Para evaluar la precisión y la validez de las estimaciones, se utilizaron métricas estadísticas comúnmente utilizadas en estudios de calidad del agua (Peña 2010): la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE), el Error Absoluto Medio (MAD) y el Porcentaje

de Error Absoluto Medio (MAPE%). Estas métricas permitieron cuantificar el grado de ajuste de los modelos y su capacidad predictiva.

2.2.3. Evaluación del estado trófico y ecológico

Una vez elegidos los mejores algoritmos, estos se aplicaron a las series completas de imágenes correspondientes a los años 2013 y 2020. Se generaron mapas temáticos de Chl-a, TSS y SD, los cuales fueron procesados en ENVI y posteriormente integrados en ArcMap 10.8 para su análisis espacial. A partir de estos productos, se identificaron patrones estacionales, tendencias interanuales y zonas críticas de alteración en la calidad del agua.

Para evaluar el estado trófico de la laguna, se utilizaron los umbrales propuestos por la OCDE (Martínez 1985), que clasifican los cuerpos de agua según la concentración de Chl-a y SD entre otros parámetros relacionados con la productividad biológica (Tabla 1). Esta clasificación considera tanto el uso de valores máximos y valores promedio anuales. Este estudio se centró en el análisis de los valores promedio anuales de Chl-a y SD. Esta elección metodológica se fundamenta en el objetivo de obtener una caracterización general del estado trófico dominante de la Albufera a lo largo del periodo estudiado.

Tabla 1: Valores límite (anuales) para la clasificación trófica según la OCDE.

Categoría Trófica	Chl-a med. (µg/l)	Chl-a máx. (µg/l)	SD med. (m)	SD mín. (m)
Ultraoligotrófico	< 1.0	< 2.5	> 12.0	> 6.0
Oligotrófico	< 2.5	< 8.0	> 6.0	> 3.0
Mesotrófico	2.5 - 8	8 - 25	6 - 3	3 - 1.5
Eutrófico	8 - 25	25 - 75	3 - 1.5	1.5 - 0.7
Hipereutrófico	> 25	> 75	< 1.5	< 0.7

El estado ecológico fue determinado conforme a la Directiva Marco del Agua (2000/60/CE) mediante el Ratio de Calidad Ecológica (RCE). Este indicador, adaptado al protocolo español MFIT-2013, compara las condiciones actuales del cuerpo de agua con su correspondiente condición de referencia (MAGRAMA 2013) y se calcula como (Ec. 1):

$$RCE = \frac{(1/CONCLOa)}{(1/CR_CONCLOa)} \quad (1)$$

donde

CONCLOa = Concentración de clorofila-a.

CR_CONCLOa = Condición de referencia para la clorofila-a (L-T28 = 5.3 mg/m³) (MAGRAMA 2013).

3. Resultados

3.1. Calibración espectral

Se desarrollaron modelos empíricos de estimación específicos para cada parámetro en estudio, mediante regresiones polinómicas ajustadas a partir de la reflectividad de las bandas del sensor. Para la

estimación de la Chl-a, la mejor correlación se obtuvo mediante el cociente entre la reflectividad en la banda verde (TM2, 530–590 nm) y el infrarrojo cercano (TM4, 850–880 nm). Esta combinación mostró una alta sensibilidad a la presencia de pigmentos fotosintéticos y ha sido previamente validada en ambientes acuáticos eutrofizados (Doña *et al.* 2011). En el caso de los TSS, la mayor correlación se observó con la banda TM4, de acuerdo con el comportamiento espectral típico de estas partículas, que presentan un máximo de reflectividad en la región del infrarrojo cercano (~830 nm) (Domínguez 2003). Para la transparencia del agua, medida mediante SD, la banda verde (TM2) mostró el mejor ajuste, consistente con la respuesta espectral en el rango de 459 a 700 nm, adecuado para estimar este parámetro (Wu *et al.* 2008).

Las relaciones espectrales obtenidas tras la calibración estadística se muestran en la Figura 2.

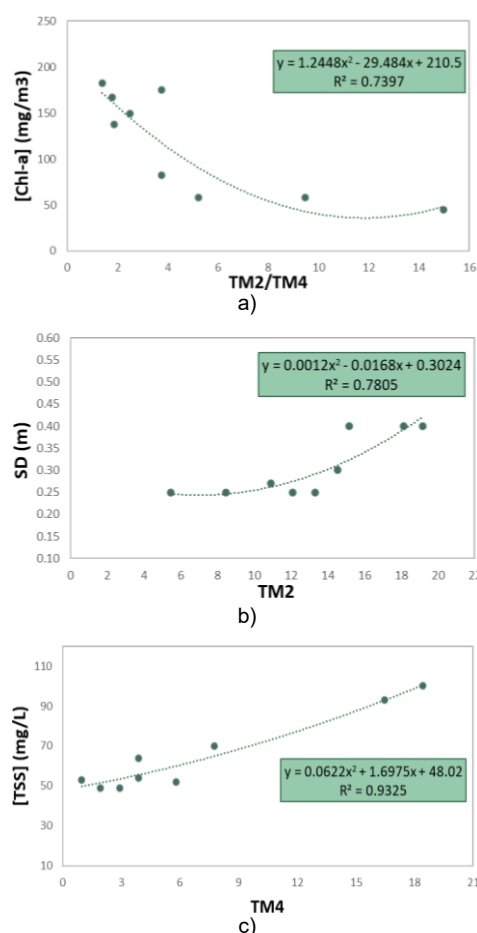


Figura 2: Relación entre la reflectividad de las bandas del sensor y los datos de campo de los parámetros estudiados: a) Chl-a; b) SD; c) TSS.

Las ecuaciones que permiten la estimación de las tres variables en estudio obtenidas de la Figura 2 son (Ecs. 2,3 y 4):

$$Chl - a = 1.245 \left(\frac{R_{verde}}{R_{NIR}} \right)^2 - 29.484 \left(\frac{R_{verde}}{R_{NIR}} \right) + 210.5 \quad (2)$$

donde

R_{verde} = Reflectividad en el verde (0.53–0.59 µm).

R_{NIR} = Reflectividad en el infrarrojo cercano (~0.85–0.88 μm).

$$SD = 0.0012(R_{\text{verde}})^2 - 0.0168(R_{\text{verde}}) + 0.3024 \quad (3)$$

donde

R_{verde} = Reflectividad en el verde (0.53–0.59 μm).

$$TSS = 0.0622 (R_{NIR})^2 + 1.6975(R_{NIR}) + 48.02 \quad (4)$$

donde

R_{NIR} = Reflectividad en el infrarrojo cercano (~0.85–0.88 μm).

3.2. Estadísticos resultantes de los algoritmos desarrollados

La validación de los algoritmos (Ecs. 2, 3 y 4) se llevó a cabo mediante análisis de regresión lineal entre los valores estimados a partir de la reflectividad satelital y los datos de campo correspondientes (Fig. 3).

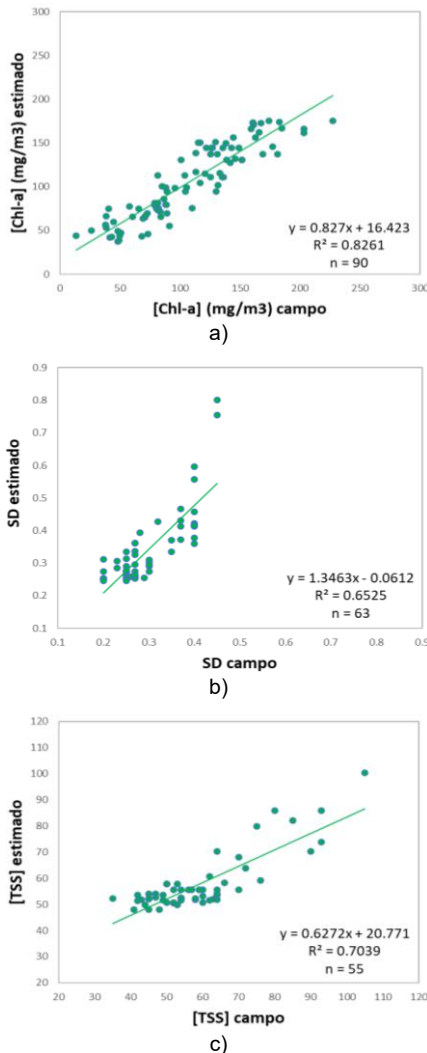


Figura 3: Validación de los algoritmos desarrollados para los parámetros: a) Chl-a; b) SD; c) TSS.

La Chl-a, con un total de 90 muestras ($n = 90$), obtuvo un RMSE de 19.39 mg/m^3 y un MAPE de 16.6%. En el caso de la transparencia del agua (SD), con 63

observaciones ($n = 63$), el RMSE fue de 0.08 m y el MAPE de 12.3%. Por su parte, los sólidos suspendidos totales (TSS), con 55 muestras ($n = 55$), alcanzaron un RMSE de 8.11 mg/L y un MAPE de 11.6% (Tabla 2).

Tabla 2: Estadísticos resultantes del modelo propuesto, para cada parámetro en estudio.

Variable	n	R^2	RMSE	MAD	MAPE%
Chl-a (mg/m^3)	90	0.826	19.39	15.4	16.6
SD (m)	63	0.653	0.08	0.048	12.3
TSS (mg/L)	55	0.704	8.11	6.64	11.6

La variación en el número de muestras entre los diferentes parámetros se debe a la eliminación de valores atípicos identificados mediante análisis estadístico, así como a la exclusión de aquellos píxeles que no presentaban valores espectralmente coherentes con las condiciones observadas en campo. Si bien los errores obtenidos no son despreciables, se consideran aceptables para aplicaciones de monitoreo ambiental, especialmente en ecosistemas complejos y dinámicos como la Albufera.

Adicionalmente, se aplicó la prueba t de Student con un nivel de significancia del 95% para determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre los valores estimados por los modelos y los datos observados en campo. Los resultados obtenidos ($p > 0.05$) indicaron que no existen diferencias significativas (Tabla 3), lo que respalda la solidez estadística de los algoritmos desarrollados y su aplicabilidad en análisis multitemporales.

Tabla 3: Estadísticos resultantes de las pruebas t de Student.

Punto de Monitorización	Chl-a Valor-p	SD Valor-p	TSS Valor-p
1	0.65	0.577	0.186
2	0.949	0.994	0.319
3	0.689	0.459	0.451
4	0.845	0.895	0.692
5	0.775	0.609	0.431

La Figura 4 compara los valores de Chl-a, SD y TSS registrados en campo con los datos estimados con satélite para el punto de monitorización 3. Se puede observar la similitud en el patrón de variación entre ambas series de datos a lo largo de los años de estudio.

3.3. Análisis multitemporal

Durante la fase de adquisición y preprocesamiento, se seleccionaron 87 escenas satelitales con buena cobertura del lago y condiciones atmosféricas favorables: 43 de Landsat 7 y 44 de Landsat 8. La aplicación de los algoritmos a esta serie temporal completa permitió generar más de 200 mapas temáticos distribuidos entre 2013 y 2020. Las Figuras 5, 6 y 7 demuestran cómo estos mapas reflejan patrones estacionales claros a lo largo del año 2020.

Los valores de Chl-a, superaron los 140 mg/m^3 todos los años, con picos particularmente pronunciados en los meses de julio, agosto y noviembre. Estos picos coinciden con el cierre prolongado de las golgas en

verano, cuando hay escaso intercambio de agua y elevada temperatura. En contraste con los valores más bajos de Chl-a, ($<40 \text{ mg/m}^3$) se detectaron a final del invierno, coincidiendo con la apertura de las golias y el vaciado de los campos después de la *Perellonà*, periodo de máxima inundación del parque natural.

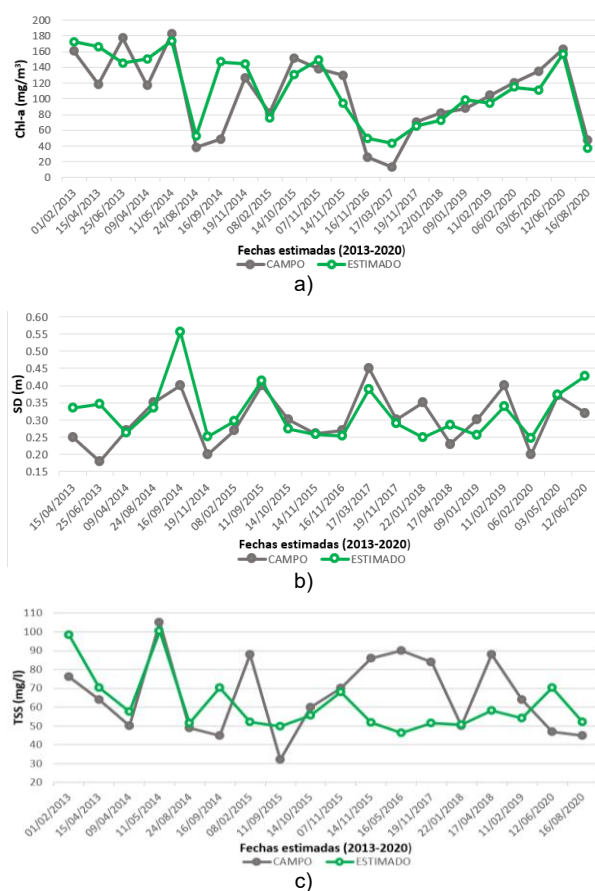


Figura 4: Evolución temporal de los valores *in situ* y estimados con satélite para el punto 3 de monitoreo: a) Chl-a; b) SD; c) TSS.

Las concentraciones de TSS alcanzaron máximos superiores a 100 mg/L , especialmente durante los meses cálidos (abril–julio), en los años 2013, 2016 y 2020; lo cual coincide con el cierre de este sistema y el periodo de fertilización de los campos. En cambio, los valores más bajos se registraron en enero, febrero y diciembre, coincidiendo con las descargas hacia el mar, lo que reduce la concentración de partículas suspendidas.

Por su parte, la transparencia del agua, evaluada mediante el SD, fue inferior a 0.25 m en otoño e invierno, mientras que los valores más altos ($>0.5 \text{ m}$) se registraron a final de invierno, principios de primavera. Los años 2018 y 2020 reflejaron condiciones ligeramente más favorables en términos de visibilidad, coincidiendo con las temporadas de menor carga de TSS en la laguna.

En 2020, la Chl-a alcanzó valores elevados en primavera, con valores superiores a 130 mg/m^3 , coincidiendo con periodos de baja renovación hídrica y aporte de nutrientes agrícolas (Fig. 5). La transparencia del agua fue variable, pero con valores inferiores a 0.30 m en marzo, mientras que en los meses cálidos

como julio y agosto se observaron valores más altos ($> 0.5 \text{ m}$) (Fig. 6). Los sólidos en suspensión superaron los 55 mg/L entre marzo y julio, disminuyendo progresivamente (Fig. 7). Este comportamiento reafirma el estado hipereutrófico de la laguna y su relación con factores estacionales y antrópicos.

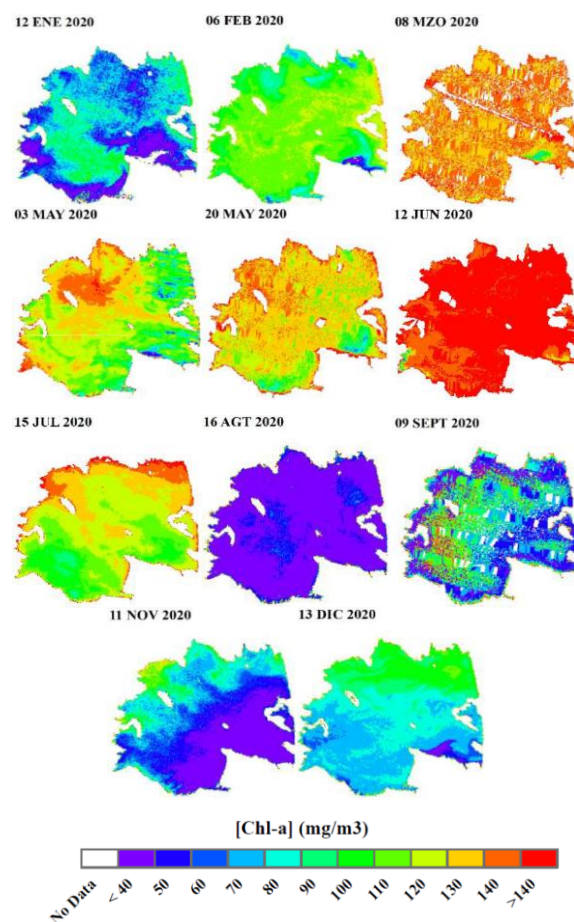


Figura 5: Evolución temporal de la concentración de clorofila-a para el año 2020.

3.4. Determinación del estado trófico y ecológico

El análisis del estado trófico, basado en los criterios de la OCDE (Martínez 1985), clasifica los cuerpos de agua en categorías basadas en la concentración de Chl-a, y la transparencia medida con el SD. Los resultados obtenidos revelaron que la laguna se encuentra en estado eutrófico a hipereutrófico de forma permanente. Este estado se caracteriza por altas concentraciones de nutrientes, lo que facilita la proliferación de algas y una mayor productividad primaria y de biomasa algal.

La evaluación del estado ecológico de la laguna se realizó mediante el Cociente de Calidad Ambiental (EQR), aplicando el protocolo MFIT-2013, que utiliza la concentración de Chl-a, como indicador biológico. Los resultados del RCE calculados con la Ec. (1) para el periodo en estudio muestran que la laguna se encuentra en un estado "malo". Esta clasificación concuerda directamente con las altas concentraciones de Chl-a, observadas en el análisis temporal.

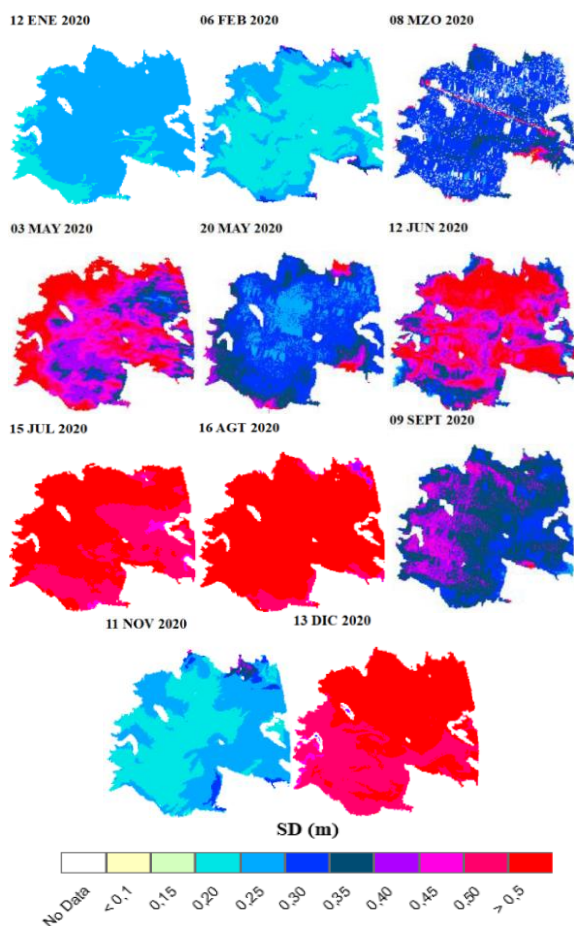


Figura 6: Evolución temporal del Disco de Secchi para el año 2020

4. Discusión

En este estudio se han desarrollado algoritmos específicos para estimar las concentraciones de Chl-a, TSS y SD del lago de la Albufera de Valencia, utilizando para ello imágenes de los satélites Landsat 7 y 8 en combinación con datos de campo. Esta integración metodológica permitió confirmar la efectividad de los índices espectrales desarrollados para el monitoreo de la calidad del agua, y facilitó un análisis espacio-temporal detallado de las condiciones del ecosistema durante el periodo comprendido entre 2013 y 2020.

En el caso de la Chl-a, se utilizó el cociente entre bandas verde e infrarrojo cercano, dada su eficacia en cuerpos de agua con alta eutrofización (Doña *et al.* 2011). Para los TSS se empleó la banda del infrarrojo cercano, ya que estos presentan un máximo de reflectividad en la región de 830 nm (Domínguez 2003). Finalmente, la estimación de la transparencia se llevó a cabo utilizando la banda verde, debido a su resolución óptima en el rango espectral de 459 a 700 nm (Wu *et al.* 2008). Esta selección espectral específica fortaleció la capacidad predictiva de los algoritmos propuestos, mejorando su desempeño en la estimación de los parámetros de calidad del agua.

La validación de los algoritmos desarrollados presentó errores estadísticos considerados aceptables, particularmente para Chl-a, (RMSE de 19.39 mg/m³), con una correlación fuerte entre los valores satelitales y

los datos medidos *in situ*. Aunque los valores MADP obtenidos para los tres parámetros evaluados no son despreciables, se consideran aceptables en contextos de monitoreo ambiental por teledetección, especialmente en ecosistemas turbios, someros y altamente dinámicos como la Albufera (Domínguez 2003).

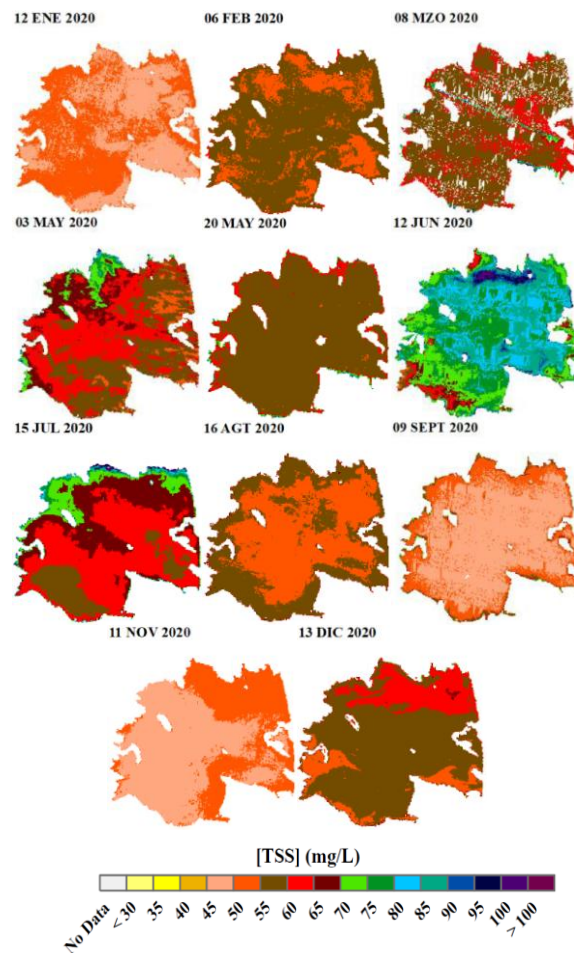


Figura 7: Evolución temporal de los sólidos en suspensión para el año 2020.

Este trabajo representa un aporte significativo al monitoreo de la calidad del agua en climas mediterráneos, donde los procesos hidrológicos y las prácticas agrícolas influyen directamente en la dinámica ecológica. Si bien existe una extensa bibliografía sobre la Albufera de Valencia, la mayoría de los estudios se han limitado a caracterizar los signos de eutrofización. En contraste, esta investigación propone un enfoque más integral y continuado, combinando herramientas de teledetección con datos de campo para evaluar, de forma sistemática, tanto el estado trófico como el estado ecológico del cuerpo de agua a lo largo de ocho años (Doña *et al.* 2011; Sòria-Perpinyà *et al.* 2019; Urrego *et al.* 2018).

La generación de mapas temáticos permitió visualizar de forma clara y precisa la evolución espacial de los principales parámetros indicadores de calidad del agua, ofreciendo un instrumento valioso para la gestión ambiental. Estos productos cartográficos, alineados con los requerimientos de la Directiva Marco del Agua (DMA), contribuyen al seguimiento de zonas críticas, la

identificación temprana de focos de deterioro y la planificación de intervenciones específicas para la mitigación de la eutrofización. Además, revelaron patrones espaciales persistentes, con áreas que mostraron concentraciones más elevadas de clorofila-a y sólidos en suspensión, especialmente en sectores próximos a entradas de agua, lo que sugiere una mayor influencia antrópica. En contraste, otras zonas mantuvieron valores bajos, evidenciando una menor presión externa. Esta heterogeneidad subraya la importancia de integrar tanto la variabilidad temporal como la distribución espacial para una evaluación más completa del estado trófico y ecológico del sistema.

A pesar de los avances logrados, este estudio presenta varias limitaciones que deben considerarse. La resolución espacial de los sensores Landsat (30 m) puede no ser suficiente para detectar pequeñas variaciones en cuerpos de agua tan heterogéneos como la Albufera. Asimismo, el fallo del sistema de corrección de línea de escaneo del sensor ETM+ de Landsat 7 (SLC-off) desde 2003 genera bandas sin datos que, a pesar de haber sido corregidas mediante interpolación, introducen un margen de incertidumbre en los análisis. En cuanto al preprocesamiento de las imágenes, la corrección atmosférica se realizó mediante el método (DOS), el cual, si bien es ampliamente utilizado, podría ser superado por técnicas más avanzadas, como los modelos físicos ACOLITE o C2RCC (Case 2 Regional Coast Colour Processor), que consideran variables atmosféricas y condiciones ambientales locales.

Para futuras investigaciones, se plantea profundizar en esta línea de investigación mediante el uso de sensores de mayor resolución espacial y espectral, como los Sentinel-2 y Sentinel-3 (OLCI) del programa europeo Copernicus, para mejorar tanto la cobertura como la calidad de las observaciones. Así como la incorporación de algoritmos de aprendizaje automático capaces de detectar relaciones ópticas complejas, mejorando así la precisión de los modelos, incluyendo el uso de técnicas avanzadas de corrección atmosférica que incluyan el tratamiento del *sunglint* (brillo especular del Sol sobre el agua) y el efecto de adyacencia, factores que pueden alterar significativamente la señal registrada por el

sensor y, por ende, afectar la precisión de los algoritmos de estimación remota (Wang *et al.* 2022).

Los hallazgos de esta investigación demuestran el potencial de la teledetección combinada con datos *in situ*, como herramienta para el monitoreo ambiental continuo y sentando las bases para el desarrollo de sistemas de alerta temprana y gestión en ecosistemas vulnerables y de alto valor ecológico como la Albufera de Valencia.

5. Conclusiones

En el presente estudio se ha desarrollado una metodología basada en teledetección para evaluar la calidad del agua en la Albufera de Valencia entre 2013 y 2020. Se analizaron parámetros como la Chl-a, los TSS y el SD, utilizando imágenes de los satélites Landsat 7 y 8 corregidas atmosféricamente. Se generaron algoritmos espectrales empíricos validados con mediciones *in situ*, lo que permitió la elaboración de mapas temáticos y la identificación de patrones estacionales y espaciales vinculados al régimen de apertura y cierre de las golas.

Los algoritmos desarrollados mostraron niveles aceptables de ajuste, con valores de R^2 entre 0.65 y 0.83, proporcionando estimaciones fiables de los parámetros analizados. La Chl-a, principal indicador del estado trófico mostró valores permanentemente elevados, clasificando a la laguna como hipereutrófica durante todo el periodo de estudio. Esta condición se reflejó en un estado ecológico “malo” en todos los años evaluados, según el RCE.

La información obtenida en este estudio aporta una base sólida para la gestión ambiental del lago de la Albufera de Valencia. La metodología empleada es fácil de replicar, económica y adaptable, convirtiéndose en una herramienta eficaz para programas de monitoreo en lagunas con características similares.

Además, al relacionar los niveles de eutrofización con el manejo hidrológico, esta investigación contribuye a una mejor comprensión de la ecología de la Albufera y refuerza la necesidad de integrar datos satelitales en la toma de decisiones ambientales.

References

- ARIZA, A., 2013. Descripción y corrección de productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission). *Instituto Geográfico Agustín Codazzi*.
- BRICEÑO, I., PÉREZ, W., SAN, M.D., and RAMOS, S., 2018. Determination of water quality in Vichuquén Lake using satellite images Landsat 8, sensor OLI, year 2016, Chile. *Revista de Teledetección*, **52**, pp. 67–78. DOI: 10.4995/raet.2018.10126
- CHUVIECO, E., 2008. Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio (3.^a ed.). Ariel.
- DOMÍNGUEZ, J.A., 2003. *Estudio de la calidad del agua de las lagunas de gravera mediante teledetección* (Doctoral dissertation, Universidad de Alcalá).
- DOÑA, C., CASELLES, V., SÁNCHEZ, J.M., FERRIL, A., and CAMACHO, A., 2011. Herramienta para el estudio del estado de eutrofización de masas de agua continentales. *Revista de la Asociación Española de Teledetección*, **36**, pp. 40–50.
- FERNÁNDEZ, I., and HERRERO, E., 2001. *Análisis visual de imágenes obtenidas del sensor ETM+. Satélite Landsat. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias, Palencia, Universidad de Valladolid*.
- GHOLIZADEH, M.H., MELESSE, A.M., and REDDI, L., 2016. A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques. *Sensors*, **16**(8), 1298. DOI: 10.3390/s16081298

- GILMORE, S., SALEEM, A., and DEWAN, A., 2015. Effectiveness of DOS (Dark-Object Subtraction) method and water index techniques to map wetlands in a rapidly urbanising megacity with Landsat 8 data. *Research@ Locate*, **15**, pp. 10-12.
- LEDESMA, C., BONANSEA, M., RODRIGUEZ, C.M., RAMÓN, A., and DELGADO, S., 2013. Determination of trophic indicators in Rio Tercero reservoir, Cordoba (Argentina). *Revista Ciência Agronômica*, **44**(3), pp. 419–425.
- LIANG, S., 2018. *Comprehensive remote sensing* (X. Xiong & J. J. Butler, Eds.; Vol. 1). Elsevier.
- MAGRAMA, 2013. Protocolo de análisis y cálculo de métricas de fitoplancton en lagos y embalses: Código MFIT-2013. Ministerio De Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Protocolo de muestreo. Available: https://www.miteco.gob.es/content/dam/mitesco/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/mfitv2-2013_20_01_2016_tcm30-175294.pdf [6/30, 2025].
- MARTÍN, M., OLIVER, N., HERNÁNDEZ-CRESPO, C., GARGALLO, S., and REGIDOR, M.C., 2013. The use of free water surface constructed wetland to treat the eutrophicated waters of Lake L'Albufera de Valencia (Spain). *Ecological Engineering*, **50**, pp. 52–61. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2012.04.029
- MARTÍNEZ, A., 1985. OCDE: La Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos y los Transportes Marítimos (1982-1983).
- MONDRÍA, M., 2010. *Infraestructuras y eutrofización en l'Albufera de València. El modelo CABHAL* [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València].
- MORENO, D., QUINTERO, J., and LÓPEZ, A., 2010. Métodos para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. *ContactoS*, **78**, pp. 25–33.
- PEÑA, D., 2010. *Análisis de series temporales*. Alianza Editorial.
- PITARCH, J., RUIZ-VERDÚ, A., SENDRA, M.D., and SANTOLERI, R., 2017. Evaluation and reformulation of the maximum peak height algorithm (MPH) and application in a hypertrophic lagoon. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **122**(2), pp. 1206–1221. DOI: 10.1002/2016JC012174
- ROMO, S., GARCÍA-MURCIA, A., VILLENA, M. J., SÁNCHEZ, V., and BALLESTER, A., 2008. Tendencias del fitoplancton en el lago de la Albufera de Valencia e implicaciones para su ecología, gestión y recuperación. *Limnetica*, **27**, pp. 11–28.
- SCHRÖDER, T., SCHMIDT, S.I., KUTZNER, R.D., BERNERT, H., STELZER, K., FRIESE, K., and RINKE, K., 2024. Exploring spatial aggregations and temporal windows for water quality match-up analysis using Sentinel-2 MSI and Sentinel-3 OLCI data. *Remote Sensing*, **16**(15), 2798. DOI: 10.3390/rs16152798
- SÒRIA-PERPINYÀ, X., URREGO, P., PEREIRA-SANDOVAL, M., RUIZ-VERDÚ, A., PEÑA, R., SORIA, J.M., DELEGIDO, J., VICENTE, E., and MORENO, J., 2019. Monitoring the ecological state of a hypertrophic lake (Albufera of València, Spain) using multitemporal Sentinel-2 images. *Limnetica*, **38**(1), pp. 457–469. DOI: 10.23818/limn.38.26
- URREGO, E.P., SÒRIA-PERPINYÀ, X., DELEGIDO, J., PEREIRA-SANDOVAL, M., RUIZ-VERDÚ, A., TENJO, C., LÓPEZ-GARCÍA, M.J., CANDELAS, F.M., VICENTE, E., SORIA, J.M., and MORENO, J., 2018. Monitoreo ecológico multitemporal de la Albufera de Valencia con imágenes Sentinel 2. In *Tecnologías de la información geográfica: Perspectivas multidisciplinares en la sociedad del conocimiento* (pp. 15–24). Universitat de València.
- USGS, 2025. Landsat Satellite Missions | U.S. Geological Survey Available: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions> [6/30, 2025].
- VASANTHI, A., and JOSHITHA, K.L., 2024. Water body detection utilizing NDWI, NDVI and NMDWI indices in SEN-12 spectral imagery. In *Proceedings of the 1st International Conference on Electronics, Communication and Signal Processing (ICECSP 2024)*. DOI: 10.1109/ICECSP61809.2024.10698263
- WU, G., DE LEEUW, J., SKIDMORE, A., PRINS, H., and LIU, Y., 2008. Comparison of MODIS and Landsat TM5 images for mapping tempo-spatial dynamics of Secchi disk depths in Poyang Lake National Nature Reserve, China. *International Journal of Remote Sensing*, **29**(8), pp. 2183–2198. DOI: 10.1080/01431160701422254
- WANG, Z., WANG, J., YAN, S., CUI, Y., and WANG, H., 2022. Annual dynamic remote sensing monitoring of phycocyanin concentration in Lake Chaohu based on Sentinel-3 OLCI images. *Journal of Lake Sciences*, **34**(2), pp. 391-403.
- ZHU, W., and XIA, W., 2023. Effects of atmospheric correction on remote sensing statistical inference in an aquatic environment. *Remote Sensing*, **15**(7), 1907. DOI: 10.3390/rs15071907

NUMERICAL MODEL FOR THE SIMULATION OF SOIL WATER FLOW: EVAPORATION ANALYSIS

MODELO NUMÉRICO PARA LA SIMULACIÓN DEL FLUJO DE AGUA EN EL SUELO: ANÁLISIS DE LA EVAPORACIÓN

Ángel del Vigo

Escuela Técnica Superior de Ingeniería en Topografía, Geodesia y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, Calle Mercator 2, 28031 Madrid, Spain. , a.delvigo@upm.es

How to cite: Á. del Vigo. 2025. Numerical model for the simulation of soil water flow: Evaporation análisis. En libro de actas: *Quinto Congreso en Ingeniería Geomática*. Valencia, 2 – 3 de Julio de 2025. <http://dx.doi.org/10.4995/CIGeo2025.2025.19868>

Abstract:

In previous publications, routine for direct integration of infiltration equation (Richards Equation) under trickle irrigation boundary conditions was presented. The model is able to simulate irrigation features as evolution of the superficial water pond, flow redistribution, overpressure around the emitter and root flow absorption, among others. It was proved that, model behaves robust and efficiently. Recently, the numerical model was improved in order to reproduce water evapotranspiration flow according to several known model schemes such as the evaporation empirical formula of del Vigo *et al.* that was inferred from experiment data taken in the province of Imbabura (Republic of Ecuador). This article presents some results provided for this numerical routine (moisture profiles and infiltration patterns) focusing in the aspects involved to evapotranspiration. The results presented in this paper were obtained with several evaporation schemes that were implemented in the routine what are tested in this article. It is conclude that, moisture pattern description are highly affected by evaporation conditions; therefore, evaporation is an important factor to consider when analyzing soil water flow dynamics in irrigation systems.

Key words: Geocomputation, Drip Irrigation, Evapotranspiration, Agriculture, Water Resources

Resumen:

En publicaciones anteriores se presentó un modelo para la integración de la ecuación de la filtración en medios porosos (Ecuación de Richards) bajo condiciones de riego por goteo. Se demostró la capacidad del modelo para simular de forma eficiente y robusta características del riego como son: la evolución del agua acumulada en la superficie (o charco), la redistribución del flujo, la sobrepresión alrededor del emisor y la absorción del flujo de agua a través de la raíz de la planta, entre otros aspectos. Recientemente, el modelo numérico ha sido mejorado dotándole de capacidad para reproducir la pérdida de flujo de agua en el sistema por evapotranspiración a través de varios modelos matemáticos de referencia (o ecuaciones empíricas). Uno de estos modelos para la evaporación es la fórmula empírica de del Vigo *et al.* que fue inferida a partir de datos experimentales tomados en un laboratorio de la provincia de Imbabura (en la República del Ecuador). Este artículo presenta algunos resultados obtenidos con el citado programa, atendiendo especialmente a los aspectos relacionados con la evapotranspiración. Se muestran y evalúan algunos resultados que se han obtenido con el programa a través de los distintos modelos de evaporación que se han implementado en el mismo. Se concluye que, los patrones de humedad y descripción del flujo están fuertemente influenciados por las condiciones de evaporación y, por lo tanto, este es un factor importante a tener en cuenta al analizar la dinámica del flujo de agua en el suelo en los sistemas de riego.

Palabras clave: Geocomputación, Riego por Goteo, Evapotranspiración, Agricultura, Recursos Hídricos

1. Introduction

Evapotranspiration is the most important factor in energy and water balance ground interchange. Studies have concluded (Brutsaert 1982; Ritchie *et al.* 2009) that evaporation involves, at least, the half of the solar incoming energy and two thirds parts of the water precipitation.

In a previous paper (del Vigo *et al.* 2023a) a numerical model for the simulation of soil water flow under root flow absorption conditions was presented. It was observed that, simulations performed under root flow absorption

conditions fitted better in front of experiments than the previous numerical model (del Vigo *et al.* 2020) what did not consider this irrigation feature. However, evaporation is a phenomenon that also substantially affects infiltration patterns, soil water flow, and therefore, water available for crops. Then, it is of great interest to implement this environmental feature to existing numerical models in order to improve its prediction capacity and progress in trickle irrigation projects. This is the main goal of the present study.

Physical based evaporation models as Philip and de Vries (1957) or Ritchie (1972), consider the equations coupling for the energy and mass transfer balance

between the soil and atmosphere interface. These equations which has been implemented in numerical models such HYDRUS (Šimůnek *et al.* 2006) may be very sensitive to initial conditions and soil characteristics. For this reason, some authors have asserted that empirical expressions may provide more precise evaporation results in simulations that physically derived formulations (Dekic *et al.* 1995; Merlin *et al.* 2016) when environmental information is known with accuracy. Furthermore, evaporation empirical models are easier and more flexible to implement in the numerical routines, because they can be introduced in the integration process as a flow sink boundary condition. This feature also makes the empirical models more efficient in terms of computational effort than physical based evaporation models. Nevertheless, validity of empirical evaporation equations is normally restricted to the area, climatic conditions and/or soil characteristics, what they were obtained for.

An explicit finite differences routine for the simulation of three dimensional water flow from trickle irrigation was developed, validated and presented in previous studies (del Vigo *et al.* 2019; del Vigo 2020). Recently, the model was improved (del Vigo *et al.* 2023a) in order to describe the root flow absorption. In this article, an evolution of this model for the simulation of soil water flow assuming evapotranspiration conditions is presented. The routine was developed to model the evapotranspiration phenomenon via the next empirical and semi-empirical schemes: Jensen and Haise (1963), Stephens (1965), Hargreaves and Samani (1985), Abtew (1996), the FAO revised Penman and Monteith model (Smith *et al.* 1998), Irmak *et al.* (2003) and del Vigo *et al.* (2023b). This last empirical equation has been recently inferred from experimental data obtained in the Imbabura province (Republic of Ecuador). Some simulations with these evapotranspiration schemes and physical conclusions are presented in this work. It was observed that this new version of the model improves the predictability of soil water dynamics in scenarios where evaporation plays a significant role.

2. Material and Methods

2.1. Simulation Scheme

A finite differences explicit scheme was developed to approximate Richards equation using a cylindrical system of coordinates (r, z) according to the trickle irrigation symmetry. Isotropic and homogeneous porous media is assumed (Eq. 1):

$$k \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial r} \left[k \frac{\partial h}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k \frac{\partial h}{\partial z} \right] + \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

Where h [m] represents the matric potential, k [m/s] the hydraulic conductivity, θ [dimensionless] is the water content and time t [s]. The approximation in terms of the potential matric field is given by Figure 1 (Eq. 2):

$$h_{t+\Delta t} = h + \frac{\Delta t \Delta h}{2 \Delta \theta} \left[\frac{k(h_2 - h_4)}{r \cdot \Delta r} + \frac{(k + k_2)(h_2 - h) + (k + k_4)(h_4 - h)}{(\Delta r)^2} + \frac{(k + k_1)(h_1 - h) + (k + k_3)(h_3 - h)}{(\Delta z)^2} + \frac{k_1 - k_3}{\Delta z} \right] \quad (2)$$

Such as, the unknown $h_{t+\Delta t}$, is solved at each point of the grid with a constant spatial resolution ($\Delta r, \Delta z$) and an adaptive time step Δt . As discussed in the bibliography (del Vigo *et al.* 2020; del Vigo 2020) next restriction for time resolution is assumed in order to ensure the numerical stability (Eq. 3):

$$\Delta t < \frac{\theta_s \cdot \Delta z^2}{8000 k_s} \quad (3)$$

Where θ_s [dimensionless] represents the soil saturated water content, k_s [m/s] is the saturated hydraulic conductivity, and $\Delta r = \Delta z$ is normally used. The code was widely validated in front of analytical solutions, other numerical models and experiments for several boundary conditions that may change with time. The model has been successfully tested to study irrigations features such as, the evolution of puddle on surface, overpressure around the emitter, infiltration-redistribution water patterns and root flow absorption, among others.

More details about the model structure, boundary conditions, validation results, and the MATLAB source code may be found at the bibliography (del Vigo 2020).

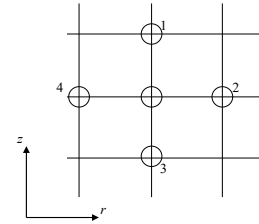


Figure 1: Discretization scheme.

2.2. Simulation Scheme

The root flow absorption sink is modelled according to the next expresión (Eq. 4):

$$q_a = q_{max} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4)$$

That represents the absorbed flow rate [s^{-1}] at each point of the root plant, as a function of time (t) from the beginning of the irrigation. The parameter q_{max} [s^{-1}] is the maximum root absorbed flow rate, at the beginning of the irrigation ($t = 0$), which is the moment when the water plant necessity and root capillary suction are maximum. The time-parameter τ [s] represents, in accordance to an electrical capacitor system, the time interval required for the absorbed flow rate to decrease to 37% of its maximum value (q_{max}). This formula is equivalent to the transient charge process of a capacitor in a DC circuit (Resistor-Capacitor circuit). Therefore, the model considers that absorbed flow rate is maximum at the beginning of the process (as plant water necessity), and it decreases with time following an exponential decay. When time tends to infinite, the absorbed flow

rate tends to zero since the root absorption potential became equal to the matric soil matrix potential.

As a macroscopic approach absorption model, the root absorbed rate (q_a) is extracted over all the grid points that belongs to the root plant domain at each time integration step. Accordingly to the system symmetry, a cylindrical root-shape is supposed, with radius R_r [m] and depth Z_r [m]. These root parameters are system inputs that may be obtained by root plant direct observation.

Integrating the Eq. (4), yields the next expression for the root plant absorbed water content (Eq. 5):

$$q_a = \frac{d\theta_a}{dt} \Rightarrow \theta_a(t) = \theta_{max} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (5)$$

Where the next relation is also obtained for the maximum absorbed water content $\theta_{max} = \tau q_{max}$ [dimensionless].

The exponential decay described by Eq (4) describes the system tendency to an energy balance when time tends to infinity. This conceptualization is analogous to the circuit intensity in a charge process of an electric capacitor system. The root uptake ends when the root absorption potential became equal to the matric soil potential following a first order differential equation. This mathematical structure is equivalent to the Neuman and Feddes modelling schemes, as was discussed in the bibliography (del Vigo *et al.* 2023a).

2.3. Evapotranspiration routine

The evapotranspiration effect is modelled via an extraction flow term that is introduced as a boundary

condition on the system surface according to the empirical and semi-empirical models that are collected at Table 1.

The routine assumes that 75% of the evaporation flux is extracted from the surface boundary grid points, while the remaining 25% is taken from the grid points immediately below, *i.e.*, the second row of the grid. Thus, evaporation water is assumed to be extracted from a superficial layer of thickness Δz , which corresponds to the spatial grid resolution in the vertical direction in the simulations performed.

Apart from the evapotranspiration schemes given in Table 1, any other evaporation empirical equation may be easily implemented in this routine if were needed.

The model presented in the last row of this table (Colimba and del Vigo model) was inferred using experimental data obtained in a laboratory located at the province of Imbabura, in the Republic of Ecuador (del Vigo *et al.* 2023b).

3. Results and discussion

Some simulations results are presented in this article to display the characteristics and functionality of the evapotranspiration routine. The soil used in these simulations is described in the Tables 2 and 3 (the site of Natabuela, province of Imbabura, Republic of Ecuador):

The irrigation time used for the simulations presented in this paper was $t_{irr} = 5min$ at a constant flow rate of $q = 2.1L/h$, in all cases. Other data used in the simulations presented are collected in Table 4.

Table 1: Empirical and semi-empirical models implemented in the numerical routine. Reference evapotranspiration ET_o [mm/day]. The rest of the parameters are: daily average temperature T_m [°C], solar irradiation R_s [mm/day], maximum daily temperature T_{max} [°C], minimum daily temperature T_{min} [°C], average wind speed v_m [m/s], slope of vapor pressure curve Δ [kPa/°C] and psychrometric constant γ [kPa/°C].

Empirical Formula	Evapotranspiration (ET_o)
Jensen and Haise (1963)	$ET_o = R_s(0.0252T_m + 0.078)$
Stephens (1965)	$ET_o = R_s(0.0158T_m + 0.09)$
Hargreaves and Samani (1985)	$ET_o = R_s \cdot 0.0023 \cdot (T_{max} - T_{min})^{1/2} \cdot (T_m + 17.8)$
Abtew (1996)	$ET_o = 0.01786 \cdot R_s \cdot T_{max}$
FAO-56 (1998)	$ET_o = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot R_s + 900 \cdot \gamma \cdot v_m / (T_m + 273)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34v_m)}$
Irmak (2003)	$ET_o = -0.611 + 0.149 \cdot (2.451) \cdot R_s + 0.079 \cdot \frac{T_{max} - T_{min}}{2}$
del Vigo and Colimba (2023)	$ET_o = 0.258 \cdot T_m + 0.111 \cdot R_s - 4.307$

Table 2: Physical soil parameters. Experimental data. Site of Natabuela (Imbabura Province, Republic of Ecuador).

Parameters	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	Density (g/cm ³)	θ_{33kPa}	$\theta_{1500kPa}$
Sandy-loam	9	34	57	1.22	0.3538	0.1455

Table 3: Van Genuchten-Mualem coefficients. Data estimated by ROSETTA software using the information given at Table 2. Site of Natabuela (Imbabura Province, Republic of Ecuador).

Parameters	θ_r	θ_s	α (cm ⁻¹)	n	k_s
Sandy-loam	0.0515	0.4518	0.0044	1.5427	0.03453

Table 4: Other simulation parameters. Environmental data, boundary conditions and numerical resolution.

Parameters	T_m (°C)	T_{max} (°C)	T_{min} (°C)	R_s (mm/day)	P (kPa)	v_m (m/s)	θ_{max}	τ (min)	R_r (cm)	Z_r (cm)	$N_r = N_z$	$dr = dz$ (cm)
Data	20	28	10	4	75.54	1	0.01	20	10	10	40	1

Figure 2 presents results obtained by the model in a bare soil (no-root conditions) using the evapotranspiration schemes collected at Table 1. Notice that, under no evaporation conditions (black continue line) moisture content under the dripper is maximum at any depth. Penman and Monteith (FAO-56 1998) and del Vigo-Colimba (2023) empirical schemes are also marked using a continue line representation in this picture.

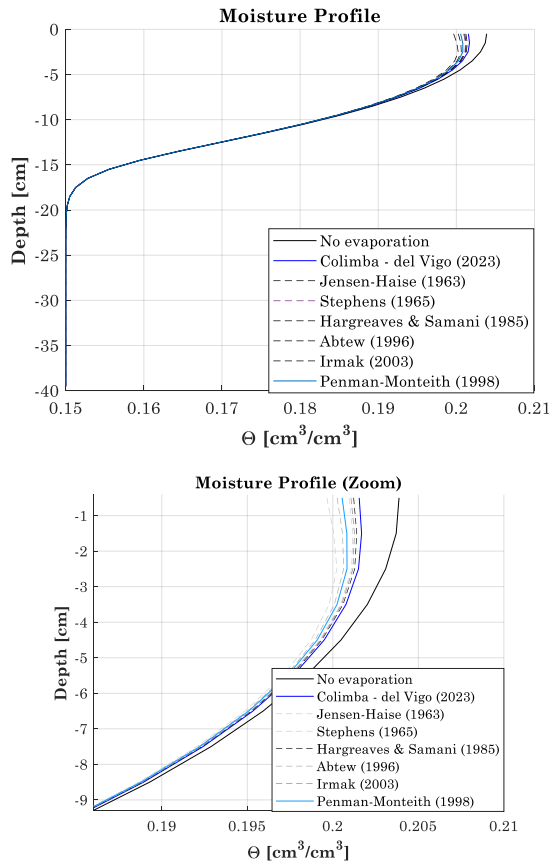


Figure 2: Moisture profile under the dripper at 120 minutes after irrigation starts. Bare soil. Comparison among models given in Table 1. Time of irrigation $t_{irr} = 5$ min, using an applied flow rate of $q = 2.1$ L/h. Environmental data: $T_m = 20^\circ\text{C}$, $R_s = 4$ mm/day, $T_{max} = 28^\circ\text{C}$, $T_{min} = 10^\circ\text{C}$, $h = 2445$ m and $v_m = 1$ m/s.

It might be notice that, evaporation conditions affects mainly to the water content near the surface. As seen in Figure 2, the moisture content profile is similar for all the curves (including no evaporation) under 8 cm depth. Moreover, it is seen that, under this conditions, the model of Colimba and del Vigo predicts the lower evaporated water rate among the models. Besides, though the appreciable differences among these curves, water content variations on the surface are not much significant among these models. For instance, according to Figure 2 the maximum surface water content deviation between these models (corresponding to the differences between Jensen and Haise and del Vigo and Colimba

models) is only around 0.9%. On the contrary, the differences observed in surface water content between evaporation and no-evaporation conditions are significant ($\Delta\theta \cong 0.004$), especially taking into account that the experimental uncertainty of typical soil hygrometers is around $\Delta\theta \cong 0.001$.

Figure 3 presents differences in the moisture content profile prediction under the dripper for several irradiation rates according to del Vigo and Colimba model evaporation scheme, at 120 minutes after the irrigation starts ($t_{irr} = 5$ min). It is observed that, as solar irradiation increases, the surface moisture content decreases. The differences in the surface water content between the no-evaporation conditions and the rest of the curves that considers the evaporation effect, range from 1.2% to 2.3% depending on solar irradiation data. This corresponds to a difference in terms of water content in the range $\Delta\theta \cong (0.001, 0.003)$.

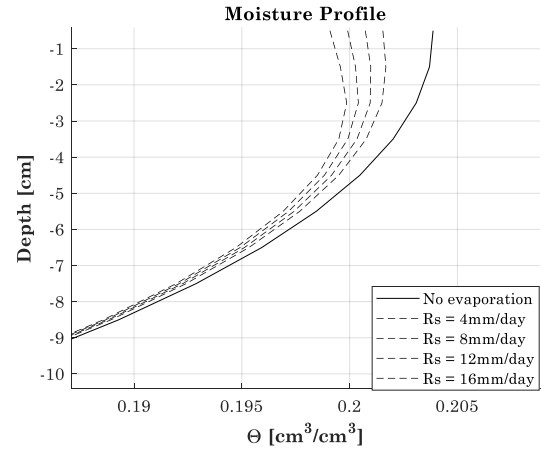


Figure 3: Moisture profile under the dripper at 120 minutes after irrigation starts. Bare soil. No evaporation conditions (continue line) in front of evaporation conditions (dash lines) for different solar irradiation rates: $R_s = 4, 8, 12, 16$ mm/day. Constant daily average temperature $T_m = 20^\circ\text{C}$. Evaporation model of del Vigo and Colimba (2023).

On the contrary, Figure 4 represents various moisture content profile results obtained for different daily average temperature data, according to the del Vigo and Colimba (2023) evaporation scheme. It is clearly observed that this is a more affecting factor to the surface water content, giving arise deviations from no-evaporation condition in a range from 1.2% to 3.1% (up to $\Delta\theta \cong 0.006$ in terms of water content). It might be notice that, coefficient associated with daily average temperature is higher in this evaporation scheme (Tab. 1) that the coefficient related to the solar irradiation: $0.258 > 0.111$.

Figure 5 represents moisture content isolines (infiltration patterns) for the bare soil described in Table 2. Results over the plane of symmetry r - Z are given in this picture. The evaporation scheme of del Vigo and Colimba (2023) is also used in this simulation. Figure 5 shows the infiltration patterns obtained under no-evaporation conditions (continue lines) in front of patterns yielded

using the mentioned evaporation scheme. The effect of evaporation is evident, with an increasing loss of moisture content over time near the surface, due to the evaporation process.

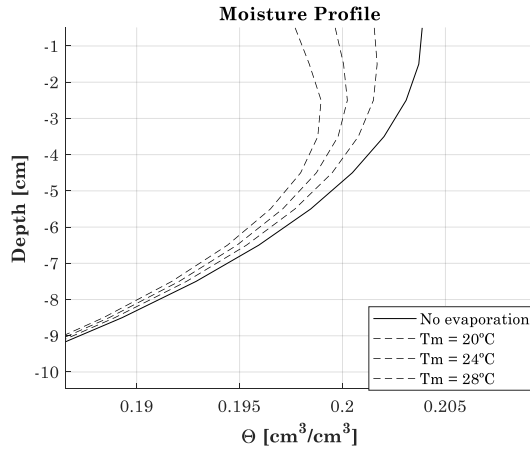


Figure 4: Moisture profile under the dripper at 120 minutes after irrigation starts. Bare soil. No evaporation conditions (continue line) in front of evapotranspiration conditions (dash line) for various daily average temperature: $T_m = 20, 24, 28^\circ\text{C}$. Constant solar radiation at $R_s = 4\text{mm/day}$. Evaporation scheme of del Vigo and Colimba (2023).

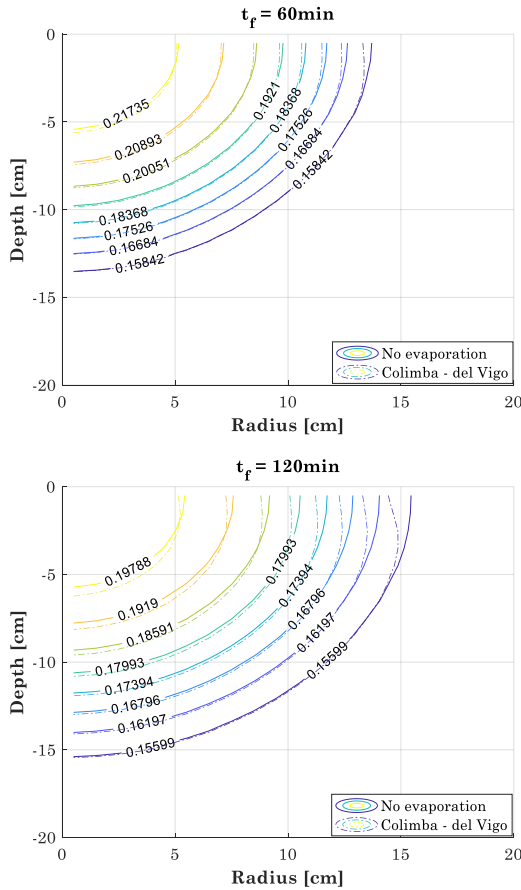


Figure 5: Moisture content patterns at 60 minutes and 120 minutes after irrigation. No evaporation conditions (continue line) in front of evapotranspiration conditions (dash line). Evaporation scheme of del Vigo and Colimba (2023). Time of irrigation $t_{ir} = 5\text{min}$ for an applied flow rate of $q = 2.1\text{L/h}$. Environmental data: $T_m = 20^\circ\text{C}$ and $R_s = 4\text{mm/day}$.

Finally, Figure 6 represents the combined effect of root flow absorption with the evaporation water sink. In the first case, (up picture) it is represented the independent effect of evaporation (dash line) against the root flow absorption (dot line). The second case (down picture) represents the combined effect of evaporation and root flow absorption over the system. It is clearly observed that root water sink affects regularly to all the system while the evaporation is mainly significant near the surface. This figure represent moisture patterns at 120 minutes after the irrigation starts. Model of del Vigo and Colimba (2023) for evaporation and del Vigo *et al* (2023) for root flow absorption were used in this simulation.

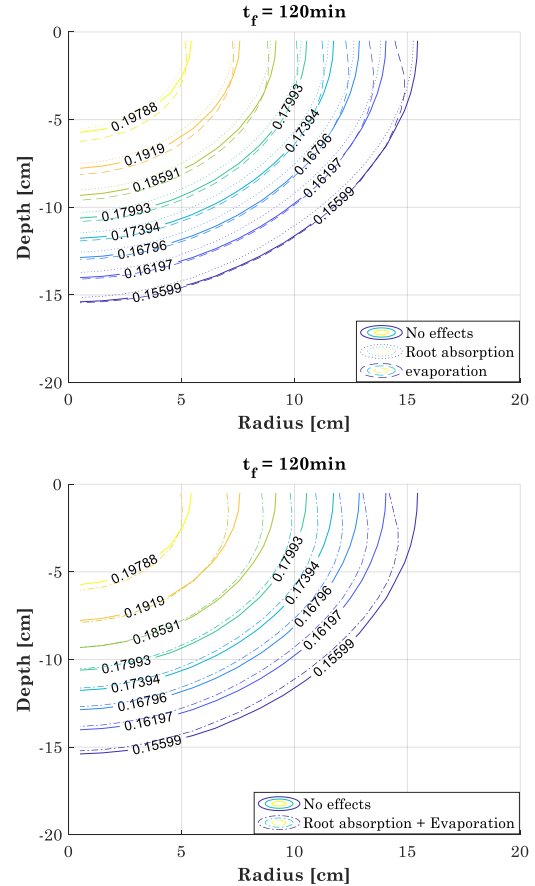


Figure 6: Infiltration patterns 120 minutes after irrigation. Up: bare soil with no-evaporation conditions (continue lines), in front of bare soil with evaporation conditions (dash line) and soil affected by root absorption without evaporation effect (dot lines). Down: no-evaporation conditions for a bare soil (continue lines), in front of results for the combined effect of evapotranspiration and root absorption conditions (dot-dash lines). The scheme of del Vigo and Colimba (2023) for evapotranspiration was used. The root absorption routine (del Vigo *et al.* 2023) was also used in this simulation. The time of irrigation was $t_{ir} = 5\text{min}$ at an applied flow rate of $q = 2.1\text{L/h}$. Root absorption parameters and environmental data are given at Table 4.

It was observed, accordingly to this figure that, two hours after the irrigation starts the evaporation volume loose was 9.04% in front of the total water volume applied to the system. On the other hand, the root absorption sink was 10.11% of the total applied volume. Moreover, it is seen that the combined effect of evaporation and root uptake curves at Figure 6 (down) is approximately equal to the superposition of the two independent effects (up).

Nevertheless, this visual property must not be interpreted as the sum of two particular solutions since the governing equations describing these phenomena are nonlinear. Remarks that, when considering both effects at the same time root flow uptake influence over evapotranspiration effect, and viceversa; then, the final result is not exactly the same as the sum of both independent effects.

4. Conclusions

An improved numerical model with capacity to describe soil evapotranspiration water flow is presented in this article.

The experimental analysis performed in previous publications (del Vigo *et al.* 2023) established that daily average temperature and irradiance are the two main factors involved in evapotranspiration process. This is rational from a physical point of view because these two magnitudes affects to evaporation during the entire day. On the contrary, factors such as maximum and minimum daily temperature that are used in other evaporation schemes collected at Table 1 are typically relevant only during a day interval. In this sense, empirical models that

depends on daily average temperature and irradiance, such as Jensen and Haise (1963), Stephens (1965) or del Vigo *et al.* (2023), should be more accurate than others what depends on magnitudes with less influence in evapotranspiration as mentioned before. Obviously, complex models that depends on daily average temperature and irradiance, but also, include extra information as pressure or wind velocity, such Penman and Monteith model are accurate while all the environmental data and parameters are known.

The numerical model presented in this article improve the last version of the code and provide results that are consistent from a physical point of view. The simulation results conclude that soil water content decrease significantly when evaporation conditions are assumed around the surface layer, as expected. Depending on the empirical scheme, it can be found slightly differences for the available water content in this layer (Fig. 2).

It clearly established that moisture content patterns are highly influenced by the effect of evaporation and root uptake as illustrated in Figures 5 and 6. Thus, including this irrigation features in the simulation models is needed to find accurate physical descriptions.

References

- ABTEW, W., 1996. Evapotranspiration measurements and modeling for three wetland systems in South Florida. *Journal of the American Water Resources Association*, **32**(3), pp. 465-473.
- BRUTSAERT, W., 1982. Evaporation into the Atmosphere Theory, History and Applications. Environmental Fluid Mechanics (Vol. 1). *Springer Science & Business Media*. Dordrecht
- DEKIC, L.J., MIHAJLOVIC, D.T. and RAJKOVIC, B., 1995. A study of the sensitivity of bare soil evaporation schemes to soil surface wetness, using the coupled soil moisture and surface temperature prediction model, BARESOIL. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **55**, pp. 101-112.
- DEL VIGO, Á., 2020. Simulación del flujo del agua en el suelo en riego por goteo superficial, soluciones analíticas aproximadas, caracterización del suelo y diseño de los riegos. Phd. Thesis, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. DOI: 10.20868/UPM.thesis.63840
- DEL VIGO, Á., ZUBELZU, S. and JUANA, L., 2019. Study of water infiltration in soil by Richards equations in 3D: summary and methodology validation. *11th World Congress on Water Resources and Environment*. Madrid. Spain. Available: http://ewra.net/pages/EWRA2019_Proceedings.pdf [8/15, 2012].
- DEL VIGO, Á., ZUBELZU, S. and JUANA, L., 2020. Numerical routine for soil water dynamics from trickle irrigation. *Applied Mathematical Modelling Journal*, **83**, pp. 371-385. DOI: 10.1016/j.apm.2020.01.058
- DEL VIGO, Á., COLIMBA, J., JUANA, L. and RODRÍGUEZ-SINOBAS, L., 2023a. Numerical model for the simulation of soil water flow under root-absorption conditions. Application to tomato plant crop. *Irrigation Science*, **41**, pp. 141-154. DOI: 10.1007/s00271-022-00806-x
- DEL VIGO, Á., COLIMBA-LIMAICO, J.E. and RODRÍGUEZ-SINOBAS, L., 2023b. Experimental analysis of depending on temperature and solar radiation evapotranspiration empirical models at Republic of Ecuador. *EGU General Assembly 2023*, Vienna, Austria, 24-28 Apr 2023. EGU23-16225. DOI: 10.5194/egusphere-egu23-16225
- HARGREAVES, G.H. and SAMANI, Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied engineering in agriculture*, **1**(2), pp. 96-99
- IRMAK, S., IRMAK, A., ALLEN, R.G. and JONES, J.W., 2003. Solar and net radiation-based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates. *Journal of irrigation and drainage engineering*, **129**(5), pp. 336-347.
- JENSEN, M.E. and HAISE, H.R., 1963. Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, **89**(4), pp. 15-41.
- MERLIN, O., STEFAN, V., AMAZIRH, A., CHANZY, A. and CESCHIA, E., 2016. Modeling soil evaporation efficiency in a range of soil and atmospheric conditions using a meta-analysis approach. *Water Resources Research*, **52**(5), pp. 3663-3684.
- PHILIP, J.R. and DE VRIES, D.A., 1957. Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Transactions American Geophysical Union*, **38**, pp. 222-232.

- RITCHIE, J.T., 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resour. Res.*, **8**, pp. 1204-1213.
- RITCHIE, J.T., PORTER, C.H., JUDGE, J., JONES, J.W. and SULEIMAN, A.A., 2009. Extension of an existing model for soil water evaporation and redistribution under high water content conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **73**, pp. 792-801.
- ŠIMŮNEK, J., VAN GENUCHTEN, M. and ŠEJNA, M., 2006. The HYDRUS Software Package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media, Technical Manual Version 1.0. University of California Riverside. Riverside, CA, 3PC. Progress, Prague. Czech Republic.
- SMITH, M., ALLEN, R., and PEREIRA, L., 1998. Revised FAO methodology for crop-water requirements (IAEA-TECDOC-1026). International Atomic Energy Agency (IAEA).
- STEPHENS, J.C., 1965. Discussion of "Estimating evaporation from insolation". *Journal of the Hydraulics Division*, **91**(5), pp. 171-182.

MOBILE PHOTOGRAMMETRY AND SEMI-SYNTHETIC 3D DATA FOR CLASSIFYING CRANIAL PATHOLOGIES WITH AI

FOTOGRAMETRÍA MÓVIL Y DATOS 3D SEMISINTÉTICOS PARA LA CLASIFICACIÓN DE PATOLOGÍAS CRANEALES CON IA

Omar Christian Quispe-Enríquez*, José Luis Lerma

Photogrammetry and Laser Scanner Research Group (GIFLE), Dept. of Cartographic Engineering, Geodesy, and Photogrammetry, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain. , ocquienr@topo.upv.es; , jllerma@cgf.upv.es

How to cite: O.C. Quispe-Enríquez y J.L. Lerma. 2025. Mobile photogrammetry and semi-synthetic 3D data for classifying cranial pathologies with AI. En libro de actas: *Quinto Congreso en Ingeniería Geomática*. Valencia, 2 – 3 de Julio de 2025. <http://dx.doi.org/10.4995/CIGeo2025.2025.19358>

Abstract:

Cranial 3D models are essential for the analysis and early detection of deformities in infants. While they have traditionally been obtained using manual methods or 3D scanners, mobile photogrammetry offers an accessible and precise alternative. This study examines the use of PhotoMeDAS (Photogrammetric Medical Deformation Assessment Solutions), a mobile-based solution for generating 3D models with the accuracy required to assess and plan corrective interventions. Additionally, the potential of Artificial Intelligence (AI) for classifying cranial deformities is explored, although its implementation faces the challenge of limited data availability. To address this limitation, the generation of semi-synthetic data from 3D point clouds obtained through mobile photogrammetry is proposed, using a total of 60 cases (actual data). These data are classified according to different cranial pathologies, introducing controlled variations along the X, Y, and Z axes to simulate morphological changes. As a result, 2700 cases were generated, enriching the available datasets and facilitating the evaluation and application of classification algorithms such as decision trees, Random Forest, and multilayer perceptron neural networks. Preliminary results highlight the potential of PhotoMeDAS as a practical and cost-effective tool, provided that AI is efficiently integrated into future versions. However, further validation is required to confirm its applicability in actual clinical environments.

Key words: Cranial 3D models, PhotoMeDAS, Photogrammetry, Semi-Synthetic Data, Machine Learning, Artificial Intelligence

Resumen:

Los modelos 3D craneales son fundamentales para el análisis y detección temprana de deformidades en bebés. Aunque tradicionalmente se obtienen con métodos manuales o escáneres 3D, la fotogrametría móvil ofrece una alternativa accesible y precisa. Este estudio analiza el uso de PhotoMeDAS (*'Photogrammetric Medical Deformation Assessment Solutions'*), una solución basada en dispositivos móviles para generar modelos 3D con la precisión necesaria para evaluar y planificar intervenciones correctivas. Además, se explora el uso de la Inteligencia Artificial (IA) para clasificar deformidades, aunque su implementación enfrenta el desafío de la falta de datos. Para abordar esta limitación, se propone la generación de datos semisintéticos a partir de nubes de puntos 3D obtenidas mediante fotogrametría móvil, utilizando un total de 60 datos reales. Estos datos se clasifican según los tipos de patologías craneales, introduciendo variaciones controladas en los ejes X, Y y Z para simular cambios en la morfología craneal. Como resultado, se generaron 2700 datos, enriqueciendo los datos disponibles y facilitando la evaluación y aplicación de algoritmos de clasificación, como son los árboles de decisión (*Random Forest*) y redes neuronales multicapa (*multilayer perceptron*). Los resultados preliminares resaltan el potencial de PhotoMeDAS como una herramienta práctica y económica, en tanto que se integre eficientemente la IA en futuras versiones. Sin embargo, se requiere mayor validación para su aplicación en entornos clínicos reales.

Palabras clave: Modelos 3D craneales, PhotoMeDAS, Fotogrametría, Datos semisintéticos, Aprendizaje automático, Inteligencia artificial

1. Introduction

The study of cranial deformities in infants is fundamental for their early detection and timely treatment (Benedetti and De Albuquerque 2021; Martiniuk *et al.* 2008; Mawji

et al. 2013; Wilbrand *et al.* 2011). Conventional methodologies for obtaining 3D cranial models include the use of manual tools, such as measuring tapes and craniometers, as well as high-precision 3D scanners. While manual tools are more accessible, they present

* Corresponding Author: Omar Christian Quispe-Enríquez, ocquienr@topo.upv.es

limitations in terms of accuracy and reproducibility, as the very process of manual measurement can introduce variations in the data obtained. In contrast, high-precision 3D scanners, although more accurate, tend to be expensive and less accessible for many healthcare institutions. In this context, mobile photogrammetry emerges as a viable alternative (Baselga *et al.* 2022), enabling the generation of three-dimensional models using common devices, such as smartphones.

PhotoMeDAS represents an innovative solution based on mobile photogrammetry for creating 3D cranial models (Barbero-García *et al.* 2020). Its applicability in the early diagnosis of cranial deformities could be enhanced with the use of Artificial Intelligence (AI) for the automated classification of pathologies. However, training AI models requires large and representative datasets, which poses a challenge due to the scarcity of real data.

This study proposes the generation of semi-synthetic data (MTDFP 2023) from point clouds obtained through mobile photogrammetry. The viability of these data is analysed to improve the performance of classification algorithms, and the accuracy of PhotoMeDAS in identifying cranial deformities is assessed (de Jong *et al.* 2020).

2. Materials and Methods

To capture 3D digital cranial models, the PhotoMeDAS smartphone-based application (PhotoMeDAS 2025) was used for mobile devices (Fig. 1). Herein, the Samsung Galaxy S22 was used for the data acquisition using the PhotoMeDAS version 1.7. This mobile application, through a photogrammetric processing system, generates 3D point clouds (Fig. 2) from data taken with smartphones.

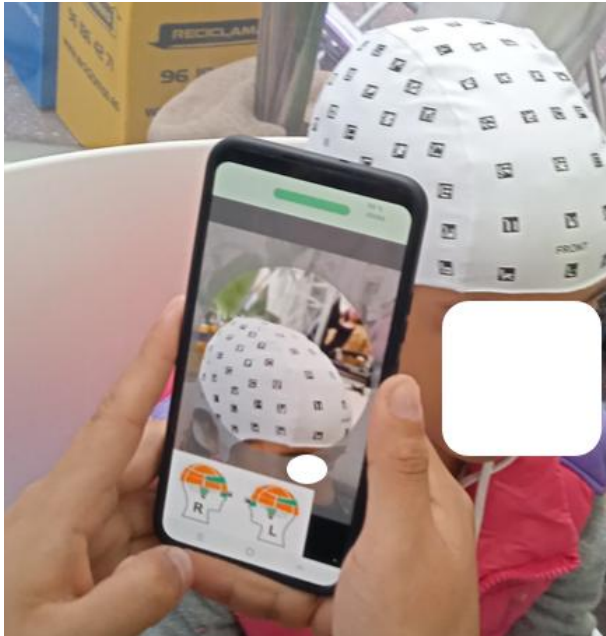


Figure 1: Data acquisition using the PhotoMeDAS mobile app.

The study was based on an initial sample of 60 infant cranial models obtained via the PhotoMeDAS app. The classification of the cases was as follows: brachycephaly (10 cases), dolichocephaly (11 cases), normocephaly (5

cases), plagiocephaly (9 cases), towering (13 cases), and trigonocephaly (12 cases).



Figure 2: Left: cap used for data capture. Right: 3D point cloud of the head obtained with the PhotoMeDAS app.

To analyse and evaluate the 3D data, CloudCompare version 2.13 software was employed (CloudCompare 2025). This software is widely used for the processing and analysis of point clouds. It allows tasks such as alignment, segmentation, comparison, and visualisation of point clouds, which are essential for the inspection and analysis of the generated cranial models.

A laptop was also used to generate semi-synthetic data, specifically an MSI Stealth 15M A11SEK, running Windows 11 Home 64-bit. This device is equipped with an Intel Core i7-1185G7 processor (11th generation), with a base frequency of 3.00 GHz and 8 cores. It also has 16 GB of RAM. The system configuration includes support for DirectX 12 and Miracast with HDCP technology, optimising graphical performance and 3D model visualisation.

2.1. Generation of Semi-Synthetic Data

To expand and diversify the available dataset for cranial morphological analysis, a semi-synthetic database was created using the Python programming language, complemented with specialised libraries for processing, structuring, and analysing three-dimensional information. These tools allowed for controlled geometric transformations to be applied to the 60 actual 3D point clouds, from which 3D models are automatically provided by the device, which was essential for simulating morphological variations observed in clinical cases and enriching the training of machine learning models.

The 60 patients selected with various craniofacial pathologies received approval from the Ethics Research Committee at the Polytechnic University of Valencia (UPV), as their inclusion falls within the scope of project number PI22/01416 (Instituto de Salud Carlos III).

2.1.1. Folder and File Organisation

The database structure and its internal management were carried out using the libraries *os*, *shutil*, and *csv*, facilitating automation in the creation, copying, and hierarchical organisation of directories and files. This approach ensured an orderly, reproducible, and easily scalable workflow, especially when working with a considerable volume of 3D models.

2.1.2. Distance Calculation and Controlled Noise Application

The preauricular distance, defined as the anatomical measurement obtained anterior to the tragus of the ear (see Fig. 2), was used as a reference parameter to establish the margin of controlled perturbation applied to the point clouds (Figs. 3 and 4). Using the pandas, math, and os libraries, random scalings.

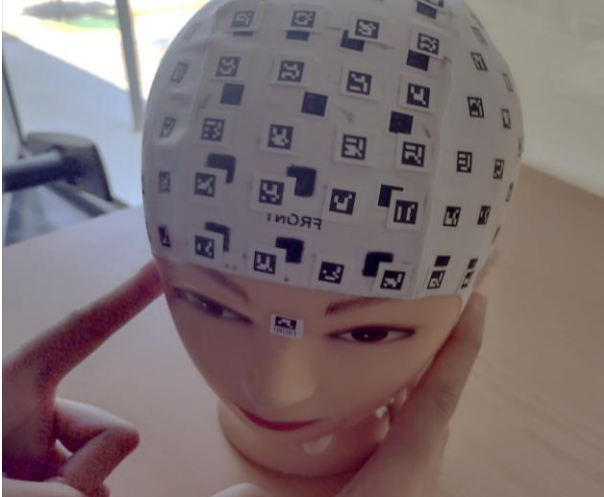


Figure 3: Representation of the preauricular distance.

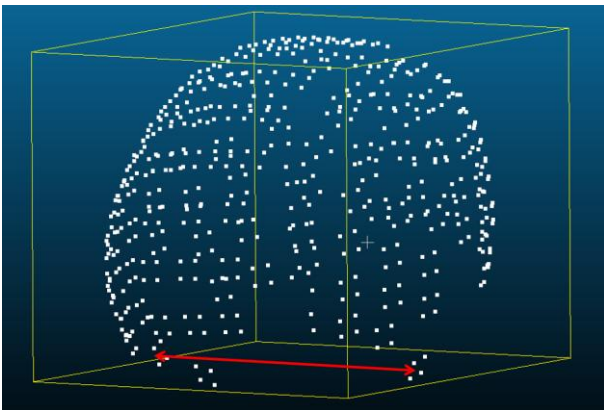


Figure 4: Identification of the preauricular distance in the 3D point cloud.

To determine the scale factor, a variation limit of ± 1 mm in the preauricular distance was established (see Table 1). Seventeen point clouds were used, to which progressive scaling was applied through tabulation until the resulting distance did not exceed a 1 mm deviation from the original model. This 1 mm threshold was selected as it corresponds to the precision range of the PhotoMeDAS device.

The transformations were applied along the X, Y, and Z axes, using scale factors ranging from 0.985 to 1.015 (see Table 2).

These perturbations were implemented under three configurations: simultaneously along all three axes, along the XY plane, and isolated along the Z-axis. The application of these scaling factors aimed to simulate controlled morphological variations while preserving the main characteristic of the pathology, thereby generating a semi-synthetic dataset.

Table 1: Identification of the preauricular distance (pd) in the 3D point cloud. Case 10.

pd (cm)	Scale Factor
81.4	0.985
81.5	0.986
81.6	0.987
81.6	0.988
82.5	0.998
82.6	0.999
82.6	1.000
82.7	1.001
82.8	1.002
83.5	1.011
83.6	1.012
83.7	1.013
83.8	1.014

Table 2: Identification of the preauricular distance (pd) in the 3D point cloud.

Case	Lower scale factor (pd -1.00 mm)	Upper scale factor (pd +1.00 mm)
1	0.991	1.010
2	0.990	1.011
3	0.985	1.015
4	0.987	1.012
5	0.988	1.013
6	0.988	1.011
7	0.987	1.014
8	0.988	1.011
9	0.990	1.011
10	0.987	1.012
11	0.987	1.013
12	0.988	1.013
13	0.989	1.011
14	0.989	1.010
15	0.988	1.011
16	0.991	1.009
17	0.986	1.011
Mean	0.988	1.012
Min	0.985	1.009
Max	0.991	1.015

Additionally, a strategy was implemented based on the application of random arithmetic increments to the spatial coordinates representing the position of the markers on each model. This modification aimed to simulate slight variations that may occur during the placement process, replicating potential deviations in marker positions relative to the patient's anatomy. The increments were applied randomly along the X, Y, and Z axes, with values ranging from -0.5 mm to 0.5 mm,

generating subtle but significant displacements (Figs. 5 and 6) that introduced an additional level of spatial variability.

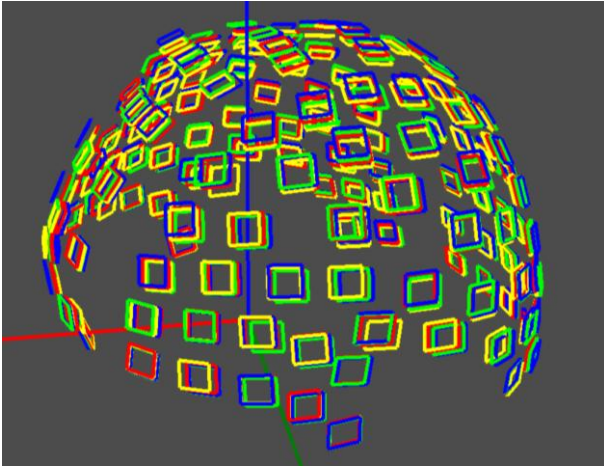


Figure 5: Overlay of the semi-synthetic data generated from controlled noise.

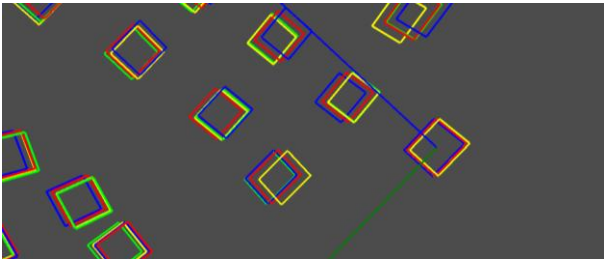


Figure 6: Representation of variation in semi-synthetic 3D models.

This simulation sought to strengthen the robustness of the classification models against common positioning errors in true clinical environments, contributing to a more realistic and complete representation of potential data acquisition scenarios.

As a result of this process, 2,700 semi-synthetic 3D models were generated by applying controlled modifications along the X, Y, and Z axes.

2.2. Creation and Structuring of the Database

The datasets were organised and prepared using the pandas and os libraries, enabling efficient structuring tailored to the needs of machine learning workflows. This systematic approach ensured accessible, reproducible, and scalable data processing.

For each digital skull model, the distance from the origin of the coordinate system (0,0,0) to every vertex on the 3D surface was computed (see Fig. 7), providing a quantitative descriptor of cranial morphology. These 134 distance values, along with the case label, serve as input features for training, validating, and evaluating the classification algorithms.

2.2.1. Classification with Artificial Intelligence

To ensure an objective and balanced evaluation of the classification models' performance, the generated database was segmented into three subsets: training (70%), validation (15%), and testing (15%). This division

allowed for a rigorous evaluation of the algorithms' generalisation capability and facilitated their subsequent fine-tuning and optimisation. In this stage, three AI-based classification approaches were implemented and compared: (1) Decision Tree model, which makes use of hierarchical rules for decision-making; (2) Random Forest, an ensemble model that combines multiple decision trees to improve accuracy and reduce overfitting; and (3) multilayer perceptrons (MLP), a deep learning architecture capable of modelling complex non-linear relationships between input data. Each of these models was trained using the described partition, enabling a systematic validation of their performance and a comparison of their effectiveness in the cranial morphological classification task.

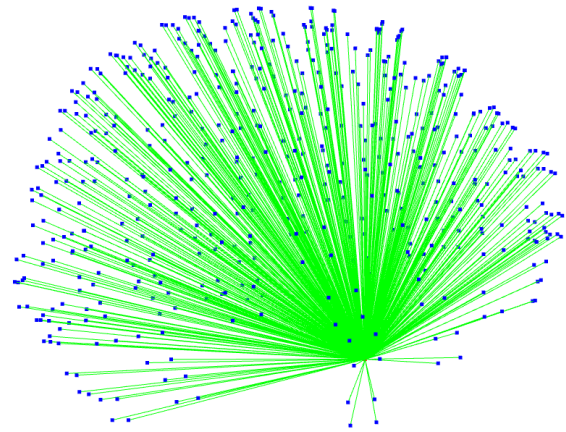


Figure 7: Representation of variation in semi-synthetic 3D models.

3. Results

The Decision Tree model showed a progressive improvement in accuracy as the Tree Depth increased (Fig. 8). With a Depth of 3, the accuracy was 54.81%, which increased to 61.73% with a Depth of 4. At greater Depths, such as 5, an accuracy of 70.86% was achieved. With a Depth of 8, the accuracy increased to 94.57% and stabilised at 96.05% with a Depth of 10. This level of accuracy remained consistent with depths of 15 and 20, reaching 96.30% in both cases. These results highlight that from Depth 8 onwards, accuracy stabilised, suggesting that further increases in Depth did not result in significant improvements in model performance.

In the Random Forest model analysis, different combinations of the number of estimators ($n_{\text{estimators}}$) and the maximum Tree Depth (max_depth) were evaluated. The results showed a general trend of improved model accuracy as the number of estimators and the maximum Tree Depth increased (Fig. 9). In particular, it was observed that with a higher number of trees and greater depth, the accuracy approached 100%, especially from 10 estimators and Depths greater than 6. When 50 trees were used, the accuracy also approached 100% from a Depth of 6, with performance remaining at 1.0 for configurations with Depths greater than 6, and accuracies between 75.8% and 99.3% for smaller Depths. However, configurations with 50 trees and higher Depths (e.g., max_depth of 8 or 10) showed 100% accuracy on the test set, which could indicate overfitting. In these cases, the model may have learned

excessively specific patterns from the training data, losing its ability to generalise to new data. To avoid this issue, it is recommended to explore additional regularisation techniques, such as reducing the maximum Tree Depth or adjusting parameters like `min_samples_split` and `min_samples_leaf` to reduce complexity and improve the model's generalisation.

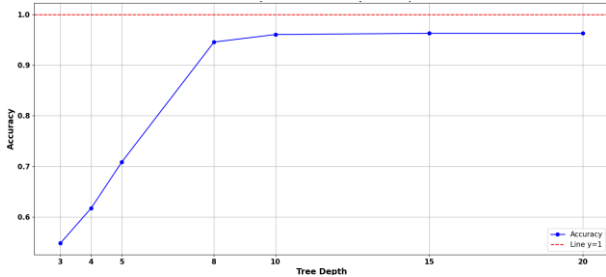


Figure 8: Relationship between Decision Tree Depth and Model Accuracy.

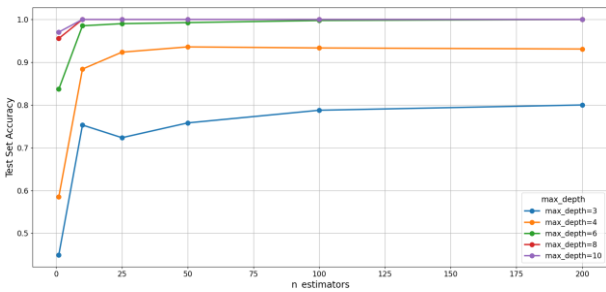


Figure 9: Relationship between the number of Trees and model accuracy by maximum Depth.

In the results obtained, the Multilayer Perceptron (MLP) model demonstrated good generalisation ability. In the validation set, the accuracy reached 99.26%, while in the test set, it achieved 99.51%. These results indicate that the model correctly classifies unseen cases, demonstrating its effectiveness and robustness in a real-world environment. The high accuracy in both validation and test sets suggests that the model not only adapts well to the training data but also maintains its performance when evaluated on new data, supporting its potential for use in practical applications for the analysis of cranial deformities.

4. Discussion

This study evaluated three machine learning models: Decision Tree, Random Forest, and Multilayer Perceptron (MLP) for the classification of cranial deformities. The Decision Tree model achieved an accuracy of 95.06% on the test set, with F1-scores exceeding 0.90 across all classes. The correspondence between class numbers and cranial deformity types is as follows: class 1 — brachycephaly; class 2 — dolichocephaly; class 3 — towering; class 4 — trigonocephaly; class 5 — plagiocephaly; and class 6 — normocephaly. The model performed particularly well in class 2 (dolichocephaly) and class 4 (trigonocephaly), with F1-scores of 0.98 in both classes. However, minor errors were noted in class 1 (brachycephaly), class 3 (towering), class 5 (plagiocephaly), and class 6 (normocephaly). Although hyperparameter optimisation

improved the model's performance, further tuning is required.

The Random Forest achieved 100% accuracy on the test set in several configurations. However, the risk of overfitting was observed, especially with deep configurations and many trees. This overfitting suggests that the model's performance could worsen with unseen data, and additional validation with independent data is recommended to ensure its robustness.

The MLP showed strong results, with 99.26% accuracy in the validation set and 99.51% in the test set. Despite a convergence warning, the results suggest the model is robust. However, exploring more iterations or hyperparameter configurations could further optimise its performance.

These three machine learning models showed good performance, but to ensure robust generalisation, further validations and hyperparameter adjustments are recommended. Additionally, the overfitting in the Random Forest should be considered for its practical deployment.

5. Conclusions

This study presents mobile photogrammetry and semi-synthetic data as innovative tools for analysing cranial deformities in infants. Mobile photogrammetry, through PhotoMeDAS, proved effective for generating 3D cranial models using accessible mobile devices, offering a cost-effective alternative either to traditional methods or high-end multi-camera systems/3D scanning systems.

The creation of semi-synthetic 3D models through controlled geometric transformations contributed to the generation of a diverse dataset, improving the performance of classification models. This approach helps mitigate the scarcity of true patient's data and found an ideal procedure for enhancing complex algorithm generalisation.

The three evaluated models—Decision Tree, Random Forest, and MLP—demonstrated high accuracy for classifying cranial deformations. The best results reached with the implemented solutions are the following ones on the test set that integrates 2700 extrapolated cases (Quispe-Enríquez and Lerma 2025): Decision Tree, 95.06%, Random Forest, 100%, and finally MLP, 99.51%. While the results are promising, further validation with independent data and exploration of more iterations or hyperparameter configurations are recommended to ensure the robustness and generalisation of the model.

In conclusion, mobile photogrammetry combined with AI techniques has great potential for the early diagnosis of cranial deformities. However, additional adjustments and validations are required to maximise its clinical applicability.

Acknowledgements

The authors acknowledge the support of the Instituto de Salud Carlos III to project number PI22/01416 and joint financing by the European Union.

References

- BARBERO-GARCÍA, I., LERMA, J.L., and MORA-NAVARRO, G., 2020. Fully automatic smartphone-based photogrammetric 3D modelling of infant's heads for cranial deformation analysis. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **166**, pp. 268–277. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.06.013
- BASELGA, S., MORA-NAVARRO, G., and LERMA, J.L., 2022. Assessment of cranial deformation indices by automatic smartphone-based photogrammetric modelling. *Applied Sciences (Switzerland)*, **12**(22). DOI: 10.3390/app122211499
- BENEDETTI, A.T., and DE ALBUQUERQUE, C.E., 2021. Morfologia craniana e a relação com tempo de parto em neonatos em uma ala materno infantil no Hospital Universitário do Oeste do Paraná. *Fag Journal of Health (FJH)*, **3**(2), pp. 124–128.
- CLOUDCOMPARE [Computer software], 2025. Version 2.13.alpha. Available: <https://www.cloudcompare.org/> [6/30, 2025].
- DE JONG, G., BIJLSMA, E., MEULSTEE, J., WENNEN, M., VAN LINDERT, E., MAAL, T., AQUARIUS, R., and DELYE, H., 2020. Combining deep learning with 3D stereophotogrammetry for craniosynostosis diagnosis. *Scientific Reports*, **10**(1). DOI:10.1038/s41598-020-72143-y
- PHOTOMEDAS, 2025. PhotoMeDAS v. 1.0.1. Productos. Available: <https://photomedas.es/info-app> [6/30, 2025].
- MARTINIUK, A.L.C., VUJOVICH-DUNN, C., PARK, M., YU, W., and LUCAS, B.R., 2008. Plagiocephaly and developmental delay: A systematic review. *Developmental Medicine and Child Neurology*, **50**(8), pp. 577–586.
- MAWJI, A., VOLLMAN, A.R., HATFIELD, J., MCNEIL, D.A., and SAUVÉ, R., 2013. The incidence of positional plagiocephaly: A cohort study. *Pediatrics*, **132**(2), pp. 298–304. DOI: 10.1542/peds.2012-3438
- MTDFP, 2023. Datos sintéticos: ¿Qué son y para qué se usan? | datos.gob.es. Available: <https://datos.gob.es/es/documentacion/datos-sinteticos-que-son-y-para-que-se-usan> [6/30, 2025].
- QUISPE-ENRIQUEZ, O.C., and LERMA, J.L., 2025. Semi-Synthetic 3D Cranial Point Cloud Dataset of Infant Cranial Morphologies: Brachycephaly, Dolichocephaly, Plagiocephaly, Normocephaly, Towering, and Trigonocephaly—Generated from 60 PhotoMeDAS Cases – Scaled Noise $\pm 2\text{mm}$ – 2700 Samples. Available: [4/29, 2025] Version 1.7.1 in Zenodo. DOI: 10.5281/zenodo.15306322
- WILBRAND, J. F., WILBRAND, M., PONS-KUEHNEMANN, J., BLECHER, J. C., CHRISTOPHIS, P., HOWALDT, H. P., and SCHAAF, H., 2011. Value and reliability of anthropometric measurements of cranial deformity in early childhood. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, **39**(1), pp. 24–29. DOI: 10.1016/j.jcms.2010.03.010

AUTOMATED FAÇADE IMAGE CLASSIFICATION MODEL FOR URBAN ANALYSIS IN MURCIA, SPAIN

MODELO AUTOMATIZADO DE CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES DE FACHADA PARA EL ANÁLISIS DEL ENTORNO URBANO DE LA CIUDAD DE MURCIA, ESPAÑA

María De La Cruz *, Sandra Martínez-Cuevas, César García-Aranda, María del Carmen Morillo-Balsera

Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, Km 7.5 de la Autovía de Valencia, 28031 Madrid, Spain. , m.delacruz@alumnos.upm.es; , sandra.mcuevas@upm.es; , cesar.garciaa@upm.es; , mariaadelcarmen.morillo@upm.es

How to cite: M. De La Cruz, S. Martínez-Cuevas, C. García-Aranda y M.C. Morillo-Balsera. 2025. Automated façade image classification model for urban analysis in Murcia, Spain. En libro de actas: *Quinto Congreso en Ingeniería Geomática*. Valencia, 2 – 3 de Julio de 2025. <http://dx.doi.org/10.4995/CIGeo2025.2025.19534>

Abstract:

The expansion of cities in recent decades represents a significant social, demographic, and architectural phenomenon, underscoring the critical role of urban planning in achieving a balanced and sustainable approach to territorial development. Machine learning, a branch of artificial intelligence (AI), employs algorithms to extract insights from data, uncover patterns, and predict future outcomes. In the urban domain, while satellite imagery has long been the preferred choice for territorial analysis, facade images have recently emerged as a valuable resource. These images offer rich visual information, making them indispensable for studies ranging from identifying structural vulnerabilities to assessing urban vitality. This study combines Geographic Information Systems (GIS) and Deep Learning techniques with verified data from the General Directorate of Cadastre in Spain to analyze the urban environment using facade images from the city of Murcia, one of Spain's most dynamic metropolitan areas. This study presents the development of an automated facade image classification model, implemented in Python using the pre-trained EfficientNetB0 architecture. This model, trained with cross-validation techniques, performs a binary image classification as part of a clustering analysis applied to the variables under investigation. The results were integrated into ArcGIS PRO, leveraging the cadastral references of the properties as key attributes for detailed spatial analysis. This approach enabled the identification of two significant areas linked to Murcia's metropolitan evolution. In conclusion, the model successfully achieves the research objectives and serves as a foundation for more in-depth urban studies focused on the city of Murcia.

Key words: GIS, Cluster, Urban growth, Deep Learning, Image classification

Resumen:

La expansión de las ciudades durante las últimas décadas constituye un fenómeno social, demográfico y edificatorio de gran impacto, consolidando la ordenación urbana como una herramienta esencial para equilibrar el desarrollo y la sostenibilidad del territorio. El aprendizaje automático, subcampo de la inteligencia artificial (IA), emplea algoritmos capaces de extraer conocimiento de los datos, identificar patrones y realizar predicciones sobre acontecimientos futuros. En el ámbito urbano, aunque las imágenes satelitales han sido tradicionalmente preferidas para el análisis territorial, las imágenes de fachada han cobrado protagonismo en los últimos años por la valiosa información visual que aportan, siendo útiles en estudios que abarcan desde la detección de vulnerabilidades estructurales hasta la evaluación de la vitalidad urbana. Este estudio integra Sistemas de Información Geográfica (SIG) y técnicas de Aprendizaje Profundo, junto con datos verificados por la Dirección General del Catastro España, para analizar el entorno urbano mediante imágenes de fachada en la ciudad de Murcia, una de las áreas metropolitanas más dinámicas de España. El trabajo propone el desarrollo de un modelo automatizado de clasificación de imágenes de fachada, implementado en Python utilizando la arquitectura preentrenada EfficientNetB0. Este modelo, entrenado con técnicas de validación cruzada, realiza una clasificación binaria de imágenes como parte de un análisis de *clustering* aplicado a las variables estudiadas. Los resultados se integraron en ArcGIS PRO, utilizando como atributo clave la referencia catastral de las viviendas para un análisis espacial detallado. El análisis permitió identificar dos zonas significativas asociadas a la evolución metropolitana de Murcia. En conclusión, el modelo cumple con los objetivos planteados en la investigación y constituye un punto de partida para estudios urbanos más profundos sobre la ciudad de Murcia, España.

Palabras clave: SIG, Clúster, Crecimiento urbano, Aprendizaje profundo, Clasificación de imágenes

* Corresponding Author: María De La Cruz, m.delacruz@alumnos.upm.es

1. Introduction

Urban sustainability is influenced by land use and city structure, with rapid expansion often affecting environmentally sensitive and hazard-prone areas (Gómez 1994). Geographic Information Systems (GIS) and Artificial Intelligence (AI), particularly “GeoAI”, enhance urban analysis by leveraging machine learning for spatial data interpretation (Li and Hsu 2022). Deep learning models like Convolutional Neural Networks (CNNs) are now widely applied to street-level facade images, providing valuable insights into urban structures, vulnerabilities, and vitality (Belinga and El Haziti 2023).

In recent years, the growth of urban environments has posed increasing challenges for spatial planning, sustainability, and equity. Traditional approaches based on satellite or aerial imagery often lack the granularity required to analyze features that directly influence the urban experience, such as building facades. Facade images provide direct visual cues about construction quality, maintenance, and socioeconomic conditions—factors essential for understanding urban transformation at the street level.

Despite the growing availability of facade datasets, few studies have integrated this resource into urban analysis using automated deep learning techniques combined with cadastral data. This study addresses that gap by proposing a novel integration of GIS tools and deep learning models for classifying facade images in the city of Murcia. Through this approach, the research contributes a replicable methodology for analyzing urban morphology and housing conditions, enhancing data-driven territorial planning and supporting informed decision-making in rapidly transforming metropolitan areas.

2. Study Area

Spain has experienced the highest increase in built-up areas within the EU, with Murcia’s Mediterranean coastline undergoing significant urban expansion (EEA 2020). Situated in an agricultural valley, the Region of Murcia has seen rapid peripheral growth driven by its evolving road network, leading to the loss of agricultural land and smaller settlements (Martí and Moreno 2014).

Murcia’s urban transformation unfolded in phases, first reshaping its historic center before expanding northward into new developments (Martí and Moreno 2014). Today, it stands as one of Spain’s fastest-growing cities, with a population exceeding 200,000 and remarkable increases in both demographic growth (55% since 1980) and real estate expansion (110%) (MIVAU 2024).

3. Materials and methods

The methodology was implemented in Python using TensorFlow 2.17, Keras, and Scikit-learn for deep learning and clustering tasks. Data preprocessing and augmentation were performed using Keras’ ImageDataGenerator, while spatial data management and visualization were conducted in ArcGIS Pro. All computations were carried out on a standard workstation with GPU acceleration.

The research methodology was structured into five main phases: (1) Data collection and structuring; (2)

Unsupervised clustering; (3) Binary classification; (4) Model training and validation; (5) Spatial integration and analysis.

First, a comprehensive database was constructed using data from the Spanish Cadastre, which was processed and managed within ArcGIS Pro.

Second, to identify patterns within the facade imagery, two unsupervised clustering methods were employed: Two-Stage Clustering and Spectral Clustering. The Two-Stage Clustering approach involved a preliminary grouping of the data, followed by a refinement step using hierarchical modeling, which automatically determined the optimal number of clusters (Bacher *et al.* 2004). In parallel, Spectral Clustering—grounded in graph theory—was implemented. This method utilized the VGG16 convolutional neural network (Simonyan and Zisserman 2015) for visual feature extraction, and subsequently applied Principal Component Analysis (PCA) to reduce the feature space dimensionality (Jolliffe and Cadima 2016). The clustering outcomes were projected onto a two-dimensional space for visualization, facilitating the interpretation of emergent urban patterns.

Third, the decision to adopt a binary classification approach was driven by the exploratory nature of the study and the structure of the dataset. The clustering results revealed two dominant facade typologies: one associated with higher construction quality and housing costs, and another characterized by greater variability and lower quality indicators. These two clusters provided a natural foundation for a binary classification framework, simplifying the task while enabling the model to focus on discriminative features that distinguish the urban core from peripheral areas. Although a multi-class classification could capture more nuanced architectural differences, the binary setup offered clarity and robustness in this initial phase of the research.

Fourth, a sequential and complementary relationship was established between unsupervised clustering and supervised classification. The unsupervised phase—comprising Two-Stage and Spectral Clustering—served to uncover latent structures in the facade dataset without the need for pre-labeled inputs. The resulting cluster assignments were then used as target classes for training the supervised deep learning model. This strategy allowed the model to learn visual patterns aligned with data-driven urban typologies, effectively bridging statistical clustering techniques and deep feature extraction via convolutional neural networks.

Finally, the clustering and classification outcomes were spatially integrated by linking them to cadastral reference data. This enabled a detailed spatial analysis of residential property characteristics across the city of Murcia, revealing patterns that support urban planning and policymaking.

4. Database

This study utilized data from the Spanish Cadastre, which includes both vector-based mapping and alphanumeric property records (DGC 2016). Facade images (Fig. 1) were downloaded from the official Cadastre platform (DGC 2024) and linked to cadastral references using ArcGIS Pro. All data were processed

and structured in a GIS database to support spatial analysis and the exploration of categorical variables.



Figure 1: Murcia façade images examples.

A total of 61,022 residential property records were identified in the city of Murcia. After downloading and filtering images, the final dataset included 39,999 facade images. A robust dataset was built, incorporating key variables such as cadastral reference, year or construction, conservation status, dwelling type, cost, among others.

This study applies descriptive statistics to analyze the categorical variables used for facade classification, examining absolute frequencies, relative percentages, and missing data. The research leverages Deep Learning to automate the classification of facades and explore spatial dependencies among dwellings.

To achieve this, the study focuses on three key variables:

- **Categorical Relative Housing Cost:** classifies dwellings into three groups - Low, Medium, and High Cost - based on their relation to the average housing cost. In Murcia, 40.2% of dwellings fall into the Low-Cost category, 28.6% are classified as Medium Cost, and the remaining 31.3% correspond to High-Cost Housing.
- **Construction Category:** classifies according to cadastral quality levels - Low, simple, Medium, High, and Very High. In Murcia, 71.5% of dwellings fall into the Medium category, while 21.6% are classified as Simple construction. Smaller proportions include 5.2% in the High category, 1.6% in the Low category, and only 0.1% in the Very High category.
- **Life Condition of the Dwelling:** based on the Cadastre's classification, includes three categories - Original State, Life Condition 1, and Life Condition 2. This variable reflects renovations and improvements aimed at extending the building's useful life. In Murcia, 48.9% of dwellings are classified under Life Condition 2, 29.9% under Life Condition 1, and only 21.1% remain in their Original State, indicating a trend toward modernizing and maintaining urban properties.

The map (Fig.2) shows that medium - and high - cost dwellings, along with those of medium construction quality, are concentrated in the city center. In contrast, low-cost dwellings and those of other construction categories are more dispersed in the peripheral areas. Additionally, dwellings in the best life condition -reflection renovation efforts- are mainly located in the city center, while Life Condition 2 dwellings and those in their original state are more scattered throughout the surrounding areas. This indicates a trend of focused renovation in the urban core, with more varied living conditions in the outskirts.

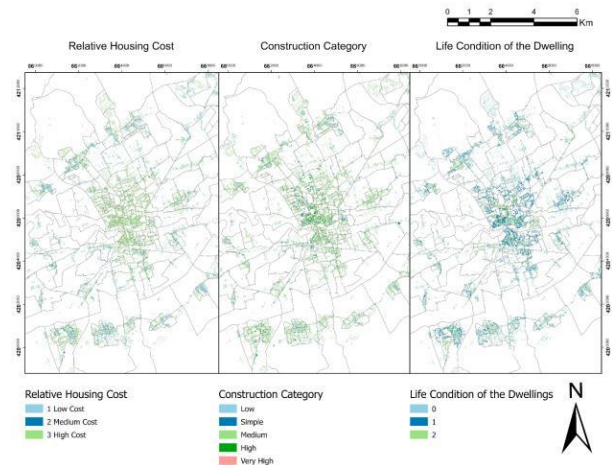


Figure 2: Study area: Region of Murcia, Spain

By structuring the data and automating analysis, the study aims to optimize fieldwork and improve the assessment of residential facade characteristics.

5. Cluster Analysis

During the initial analysis phase, a cluster analysis was performed using the three aforementioned variables. The silhouette index (Fig. 3), slightly above 0.5, indicated moderate clustering. To further explore the relationships between these variables, a principal component analysis (PCA) was conducted. The results showed that the Life Condition of the Dwelling had a negative loading, and a limited contribution to cluster differentiation. In contrast, Relative Housing Cost and Construction Category were strongly correlated, forming two well-defined clusters with strong cohesion and separation, as reflected by a silhouette score exceeding 0.5.

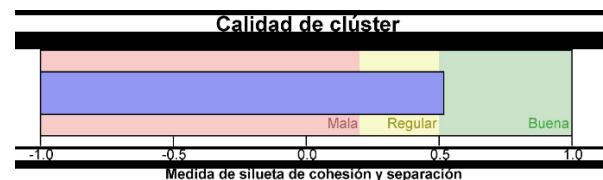


Figure 3: Silhouette Score.

Subsequently, spectral clustering was applied to the images, utilizing PCA and VGG16 neural networks (Fig. 4). The images were grouped into two clusters. Despite some overlap, the clusters remained distinct. This clustering approach proved highly effective, enhancing the model's predictive accuracy and

improving the classification of dwelling facade images in Murcia.

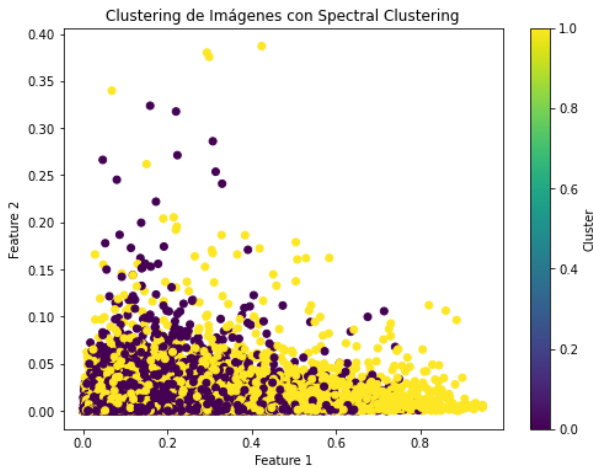


Figure 4: Spectral Clustering.

6. Classification Model

The model, based on EfficientNetB0, was trained using Python with a 5-fold cross-validation approach for binary image classification. TensorFlow, Keras, and Scikit-learn handled neural network operations, while Keras' ImageDataGenerator managed preprocessing and data augmentation. The Adam optimizer fine-tuned learning with an initial rate of 0.001, ensuring efficient training and robust performance.

The model was trained using 19,000 images in total, 9,000 from Cluster Zero (Fig. 5) and 10,000 from Cluster One (Fig. 6), ensuring a balanced distribution across the categories. The data generator split the images, with 15,200 (80%) allocated for training and 3,800 (20%) for validation, preserving a representative division for model assessment.



Figure 5: Facade images Cluster Zero.



Figure 6: Facade images Cluster One.

6.1. Metrics

The model's performance was assessed using key metrics -accuracy and loss- which are essential for binary classification. Accuracy measures the proportion of correct predictions, while the loss function quantifies the difference between predicted and actual values. Together, these metrics, derived from true positives (tp), true negatives (tn), false positives (fp), and false negatives (fn), offer a comprehensive evaluation of the model's effectiveness (Sokolova and Lapalme 2009).

The model demonstrated strong overall performance, with an average loss of 0.45 and an accuracy of 79%. Results from five folds showed no signs of overfitting, as all folds exhibited consistent trends throughout the training epochs. Fold 3 achieved the best performance, with a loss of 0.43 and an accuracy of 81.58%, indicating strong alignment with the actual values.

6.2. Visualization of the Classification Model's Performance

The model's performance for each fold is visualized through accuracy and loss graphs for both the training and validation sets. Each K-fold iteration generates two subplots, tracking the progression of these metrics across epochs. An upward trend in accuracy is expected, while a significant gap between training and validation accuracy may signal overfitting. Similarly, a steady decrease in loss is anticipated, with a rising validation loss indicating poor generalization.

To further assess the model's performance, the Receiver Operating Characteristics (ROC) curve and confusion matrix are utilized. The ROC curve plots the true positive rate against the false positive rate, with the area under the curve (AUC) summarizing the classifier's effectiveness. AUC values above 0.5 indicate performance better than random guessing. The confusion matrix highlights both correct and incorrect classifications, providing insight into model reliability (Fawcett 2005).

The graphs (Fig. 7) demonstrated steady improvement in both training and validation accuracy. Loss decreased consistently for both sets, with minimal fluctuations, reinforcing the model's effective learning and strong generalization.

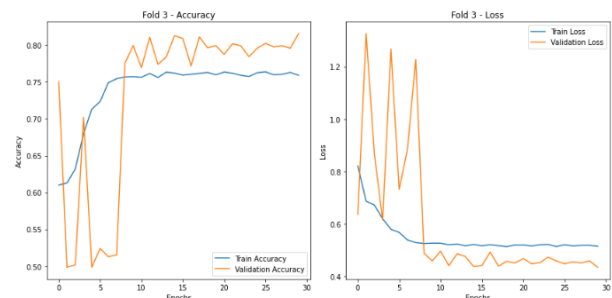


Figure 7: Accuracy and Loss Graph.

The ROC curve (Fig. 8) showed the model's performance approaching the upper left corner, with an AUC of 0.92, signifying exceptional predictive accuracy. The confusion matrix revealed that the model correctly classified 8,445 out of 9,000 instances for Class 0 (94%) and 9,345 out of 10,000 for Class 1 (93%), with relatively

low false positives and false negatives. This indicates strong class differentiation and overall effectiveness.

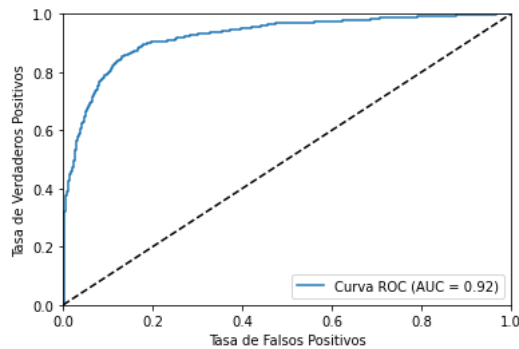


Figure 8: ROC Curve.

7. Spatial Analysis with ArcGIS Pro

After clustering and training the classification model, the results are visualized in ArcGIS Pro. The clustering output is saved as a CSV file, linking image names to cadastral references and cluster assignments. In ArcGIS Pro, an attribute join is performed using the cadastral reference, allowing clusters to be categorized and visually distinguished through color coding to emphasize spatial patterns.

The map visualization (Fig. 9) illustrates the spatial distribution of clusters, with Cluster Zero (magenta) concentrated in Murcia's city center and Cluster One (yellow) dispersed across the periphery. The model effectively differentiates dwellings based on facade characteristics, associating Cluster Zero with medium construction quality and higher housing costs. This distribution reflects Murcia's urban expansion, where the compact city center contrasts with the outward spread of new developments, shaping the city's evolving landscape.

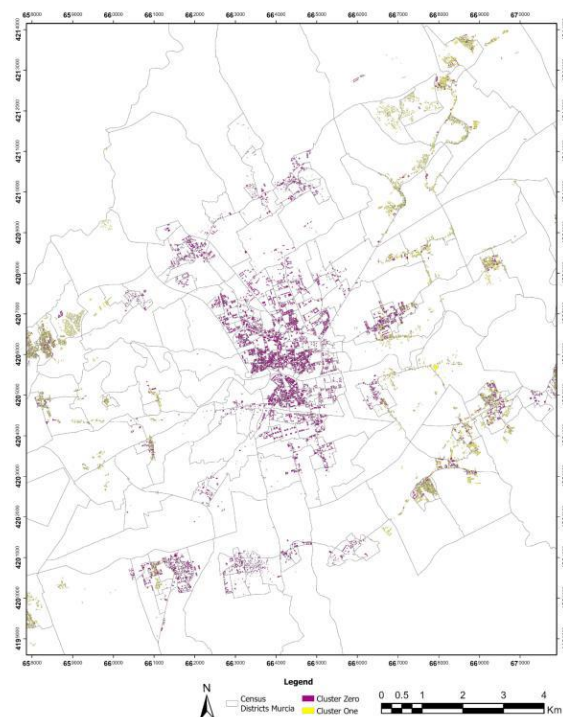


Figure 9: Spatial Analysis.

8. Discussions

The results obtained from the classification model and spatial clustering provide valuable insights into the spatial structure and housing typologies of Murcia. The high average classification accuracy (79%) and strong AUC score (0.92) demonstrate the model's robustness, even when dealing with heterogeneous, low-detail facade images. These findings suggest that combining deep learning with cadastral data enhances the predictive capacity of urban analysis tools.

The spatial clustering results reveal a pattern of urban segregation, with Cluster Zero—characterized by higher construction quality and housing cost—concentrated in the historic and central districts. In contrast, Cluster One includes dwellings with more varied construction quality and cost, distributed predominantly across peripheral areas. This aligns with known urban expansion patterns in Murcia, supporting the utility of facade-based analysis to detect underlying socio-spatial dynamics.

One limitation of this study is the reliance on static facade images, which may vary in lighting, angle, and capture conditions. Moreover, the binary classification framework, while effective, simplifies the complexity of architectural diversity. Future work could benefit from multi-class approaches, inclusion of temporal imagery to assess facade evolution, or incorporation of environmental and energy performance indicators. These improvements would strengthen the tool's utility for urban resilience planning and targeted intervention strategies in Spanish cities and beyond.

9. Conclusions

This study explores the use of machine learning classifying dwelling facade images in Murcia, addressing challenges related to limited data variability. Despite these constraints, the successful application of cluster analysis demonstrates the model's ability to autonomously classify facades.

The model effectively distinguishes facade characteristics, grouping them into two categories that correspond with the spatial distribution of Construction Category and Relative Housing Cost variables. The findings reveal a concentration of similar dwellings in the city center, while more diverse housing types are dispersed throughout the periphery.

Beyond its classification capabilities, this research establishes a foundation for future urban studies, particularly in identifying areas that require climate adaptation strategies. By integrating machine learning into urban planning, the study provides a valuable tool for decision-making, with potential applications extending across Spain's urban landscape.

Acknowledgements

The authors would like to express their gratitude to Andrei Saavedra for his valuable technical collaboration and support during the development of this research.

References

- BACHER, J., WENZIG, K., and VOGLER, M., 2004. SPSS TwoStep Cluster – A first evaluation. *Arbeits- und Diskussionspapiere*, 2(2).
- BELINGA, A.G., and EL HAZITI, M., 2023. Overviewing the emerging methods for predicting urban sprawl features. *E3S Web of Conferences*, **418**, 03008. DOI: 10.1051/e3sconf/202341803008
- DGC, 2016. Circular 04.04/2016/p, de 26 de mayo, sobre el criterio para la consideración del coeficiente de antigüedad en los casos de reforma que no puedan interpretarse como reconstrucción o rehabilitación integral a incluir en las ponencias totales y para el valor de referencia. Ministerio de Hacienda y Administraciones Públicas, Dirección General del Catastro. Available: <https://www.catastro.hacienda.gob.es/documentos/04042016P.pdf> [6/30, 2025].
- DGC, 2024. Sede Electrónica del Catastro - Inicio. Available: <https://www.sedecatastro.gob.es/> [6/30, 2025].
- EEA, 2020. The European environment — state and outlook 2020 | Publications | European Environment Agency (EEA) Available: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/soer-2020> [6/30, 2025].
- FAWCETT, T., 2005. An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, **27**(8), pp. 861–874. DOI: 10.1016/j.patrec.2005.10.010
- GÓMEZ-OREA, D., 1994. Ordenación del territorio: Una aproximación desde el medio físico. Instituto Tecnológico Geominero de España.
- JOLLIFFE, I.T., and CADIMA, J., 2016. Principal component analysis: A review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **374**(2065), 20150202. DOI: 10.1098/rsta.2015.0202
- LI, W., and HSU, C.Y., 2022. GeoAI for large-scale image analysis and machine vision: Recent progress of artificial intelligence in geography. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, **11**(7), 385. DOI: 10.3390/ijgi11070385
- MARTÍ-CIRIQUIÁN, P., and MORENO-VICENTE, E., 2014. La transformación urbana y territorial de la ciudad de Murcia y su entorno (1977–2010). *Estudios Geográficos*, **75**(276), pp. 261–309. DOI: 10.3989/estgeogr.201407
- MIVAU, 2024. Áreas urbanas en España, 2024. Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana. Available: <https://publicaciones.transportes.gob.es/downloadcustom/sample/3681> [6/30, 2025].
- SIMONYAN, K., and ZISSERMAN, A., 2015. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR 2015)*. Available: <https://arxiv.org/abs/1409.1556> [6/30, 2025].
- SOKOLOVA, M., and LAPALME, G., 2009. A systematic analysis of performance measures for classification tasks. *Information Processing & Management*, **45**(4), pp. 427–437. DOI: 10.1016/j.ipm.2009.03.002

DOCUMENTACIÓN DE EDIFICIOS DEL PATRIMONIO HISTÓRICO: FUSIÓN DE DATOS MULTISENSOR Y APRENDIZAJE PROFUNDO

HERITAGE BUILDING DOCUMENTATION: MULTISENSOR DATA FUSION AND DEEP LEARNING

Javier Raimundo

Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, Calle Mercator 2,
Madrid 28031, España. , ajramundo@alumnos.upm.es

How to cite: J. Raimundo. 2025. Documentación de edificios del patrimonio histórico: fusión de datos multisensor y aprendizaje profundo. En libro de actas: *Quinto Congreso en Ingeniería Geomática*. Valencia, 2 – 3 de Julio de 2025. <http://dx.doi.org/10.4995/CIGeo2025.2025.19850>

Resumen:

Esta investigación presenta una metodología innovadora para el análisis del patrimonio arquitectónico mediante el concepto novedoso de vóxeles multispectrales. Este enfoque novedoso revoluciona la manera de integrar, fusionar y analizar datos en forma de nubes de puntos procedentes de diversos sensores geomáticos en la conservación del patrimonio. En su esencia, la investigación presenta los vóxeles multispectrales como elementos tridimensionales unificados que combinan eficientemente datos de diferentes sensores, incluyendo cámaras de espectro visible, sensores térmicos infrarrojos y escáneres láser, entre otros. Esta estructura basada en vóxeles proporciona un marco coherente para gestionar información espacial y espectral compleja, manteniendo la integridad de los datos de cada sensor. Sobre esta base, este trabajo aplica mapas auto organizados (SOM) para analizar estos vóxeles multispectrales, permitiendo la detección automatizada y objetiva de patologías arquitectónicas. Estos algoritmos de inteligencia artificial, los SOM, revelan patrones y relaciones en los datos multisensor que serían difíciles de identificar mediante métodos tradicionales. La metodología propuesta ha sido rigurosamente validada en la Iglesia Visigoda de Santa María de Melque en Toledo (España), donde identifica y caracteriza con éxito patologías edificatorias. El estudio demuestra cómo la integración de múltiples conjuntos de datos de nubes de puntos espectrales dentro de la estructura voxelizada, combinada con el análisis SOM, proporciona una visión sin precedentes en la evaluación de edificios. Esta investigación establece un nuevo paradigma en la documentación y análisis del patrimonio, ofreciendo a los profesionales de la conservación un enfoque potente, basado en datos, para comprender y preservar edificios históricos. El éxito de esta metodología abre nuevas posibilidades para la aplicación de técnicas avanzadas de fusión de datos en la conservación del patrimonio arquitectónico.

Palabras clave: Detección remota, Fusión de Datos, Vóxel, Aprendizaje Profundo, Nube de Puntos, Patología en Edificios

Abstract:

This research introduces a groundbreaking methodology for architectural heritage analysis through the innovative concept of multispectral voxels. This novel approach revolutionizes how we integrate, fuse and analyze data from diverse geomatics sensors in heritage conservation. At its core, the research presents multispectral voxels as unified three-dimensional elements that efficiently combine data as point clouds from different sensors, including typical visible spectrum cameras, thermal infrared sensors and laser scanners, among others. This voxel-based structure provides a coherent framework for managing complex spatial and spectral information while maintaining data integrity from each sensor. Building on this foundation, this work applies Self-Organizing Maps (SOM) to analyze these multispectral voxels, enabling automated and objective detection of architectural pathologies. These artificial intelligence algorithms, SOM, reveal patterns and relationships in the multisensor data that would be difficult to identify through traditional methods. This proposed methodology has been rigorously validated at the Visigothic Church of Santa María de Melque in Toledo (Spain), where it successfully identifies and characterizes building pathologies. The study demonstrates how the integration of multiple spectral point cloud datasets within the voxel structure, combined with SOM analysis, provides unprecedented insight into building assessment. This research establishes a new paradigm in heritage documentation and analysis, offering conservation professionals a powerful, data-driven approach to understanding and preserving historical buildings. The success of this methodology opens new possibilities for the application of advanced data fusion techniques in architectural heritage conservation.

Key words: Remote Sensing, Data Fusion, Voxel, Deep Learning, Point Cloud, Building Pathology

1. Introducción

La documentación de edificios históricos ha experimentado una profunda transformación con el avance de las tecnologías geomáticas (Albertz 2002; Moropoulou *et al.* 2013; Naranjo *et al.* 2018). Actualmente, la captura de datos mediante escáneres láser terrestres, fotogrametría digital y sensores multispectrales permite generar representaciones tridimensionales de gran precisión en forma de nubes de puntos. Estas nubes, compuestas por millones de puntos georreferenciados, contienen información geométrica y radiométrica que resulta fundamental para el estudio, conservación y restauración del patrimonio arquitectónico (Grilli and Remondino 2019; Codiglion *et al.* 2024).

Sin embargo, el uso de nubes de puntos para la documentación y análisis de edificios históricos presenta importantes desafíos (Xu *et al.* 2021). En primer lugar, el procesamiento de estos enormes conjuntos de datos requiere infraestructuras informáticas avanzadas para su visualización y manipulación. Una única nube de puntos puede contener decenas de millones de elementos, lo que dificulta su gestión eficiente y análisis en tiempo real.

Más allá del volumen de información, las nubes de puntos carecen de estructura interna. Cada punto se define únicamente por sus coordenadas cartesianas tridimensionales (X, Y, Z) y atributos adicionales como color o intensidad, pero no existe información topológica que establezca relaciones entre puntos vecinos. Esta ausencia de estructura dificulta significativamente el análisis automático y la extracción de información semántica relevante para la identificación de patologías constructivas (Poux *et al.* 2017).

Otro problema fundamental es la heterogeneidad de los datos. Las nubes de puntos presentan densidades variables, con zonas de alta concentración de información (típicamente en áreas de solapamiento entre escaneos) y otras con menor densidad. Esta distribución no uniforme afecta a la precisión del análisis y complica la interpretación de los resultados (Xu *et al.* 2021).

La situación se complica aún más cuando se intentan combinar datos de diferentes sensores. Cada dispositivo captura información específica en distintas bandas del espectro electromagnético, con resoluciones y características propias. Los escáneres láser proporcionan datos geométricos precisos y valores de intensidad (Incekara and Seker 2018), las cámaras fotográficas capturan información del espectro visible, los sensores térmicos registran emisiones de calor (Kuenzer and Dech 2013), mientras que otros dispositivos pueden ser sensibles a radiación ultravioleta o infrarroja cercana. La integración de todos estos datos en un modelo unificado que permita un análisis conjunto representa uno de los mayores retos en la documentación geomática actual de elementos arquitectónicos.

Los métodos tradicionales para la fusión de datos multisensor suelen basarse en la proyección de información espectral sobre modelos geométricos (Costanzo *et al.* 2014), o en el análisis independiente de cada conjunto de datos (Luib 2019). Estos enfoques

limitan la capacidad de identificar correlaciones entre diferentes propiedades del edificio y dificultan la detección automática de patologías que podrían manifestarse en múltiples bandas espectrales.

En este contexto, existe una necesidad creciente de desarrollar metodologías que permitan la fusión efectiva de datos multisensor, manteniendo la integridad de la información original mientras se reduce la complejidad computacional. De igual importancia es la implementación de técnicas avanzadas de análisis que aprovechen toda la riqueza de la información multispectral para la identificación automática de patologías en edificios históricos.

La presente investigación acomete estos desafíos mediante el desarrollo de un nuevo método de fusión de nubes de puntos multisensor basado en vóxeles multispectrales. Esta aproximación transforma las nubes de puntos desestructuradas en una representación volumétrica uniforme que integra toda la información disponible de todos los sensores, facilitando su procesamiento y análisis mediante técnicas de aprendizaje profundo como los mapas auto organizados (SOM).

2. Vóxeles multispectrales para la fusión de datos

Las nubes de puntos, a pesar de su precisión geométrica, presentan desafíos significativos para su procesamiento y análisis. Los vóxeles, como elementos volumétricos de tamaño fijo, ofrecen soluciones efectivas a estas limitaciones.

El vóxel (elemento volumétrico) es la unidad mínima de volumen en una representación tridimensional discreta, equivalente a un píxel en la imagen bidimensional, pero en tres dimensiones (Foley 1990). Esta estructura regular ofrece soluciones efectivas a las limitaciones de las nubes de puntos en el análisis de edificios históricos.

La voxelización permite transformar enormes conjuntos de puntos desestructurados en una representación regular y organizada. Los millones de puntos inconexos se convierten en una estructura tridimensional de elementos con posiciones claramente definidas en un sistema de coordenadas común. Esta organización estructurada facilita enormemente las operaciones de búsqueda, clasificación y análisis (Gebhardt *et al.* 2009).

La discretización del espacio en vóxeles de tamaño uniforme resuelve el problema de densidades variables en las nubes de puntos originales. Las zonas con exceso de información se condensan dentro de vóxeles específicos, mientras que las áreas con menor densidad mantienen su representatividad en la estructura voxelizada, proporcionando una resolución constante en todo el modelo.

Otra ventaja fundamental es el establecimiento de una topología explícita. En una nube de puntos tradicional, determinar los vecinos de un punto específico requiere costosos algoritmos de búsqueda espacial (Shi *et al.* 2016). En contraste, la estructura de vóxeles permite conocer instantáneamente los elementos adyacentes mediante simples operaciones de indexación ($i\pm 1$, $j\pm 1$, $k\pm 1$), facilitando análisis contextuales y algoritmos que requieren información de vecindad.

2.1. El concepto de vóxel multispectral en la fusión de datos

El vóxel multispectral representa una innovación conceptual que extiende las ventajas de la voxelización tradicional al dominio de la fusión de datos multisensor (Raimundo *et al.* 2022; 2024). A diferencia del vóxel convencional, que típicamente almacena información geométrica y un único valor de propiedad (su color, comúnmente), el vóxel multispectral integra datos de múltiples sensores dentro de cada elemento volumétrico (Fig. 1).

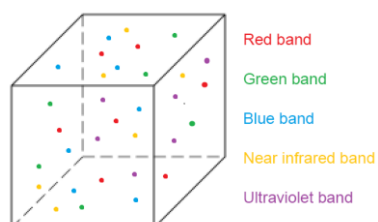


Figura 1: Concepto de vóxel multispectral.

Mientras que un vóxel estándar normalmente almacena un único valor (color), el vóxel multispectral mantiene un vector de características que incluye simultáneamente datos multispectrales heredados de los puntos de las distintas nubes de puntos en él contenidos. Esta integración multidimensional permite representar las diversas manifestaciones de las propiedades físicas de los materiales constructivos a través del espectro electromagnético.

La fusión de datos en vóxeles multispectrales ocurre a nivel espacial, garantizando que las diferentes propiedades espectrales se asocien precisamente con el mismo volumen físico. Este registro espacial inherente supera las dificultades de alineación entre diferentes sensores, problema recurrente en métodos tradicionales de fusión.

A diferencia de las técnicas que combinan datos mediante operaciones que pueden degradar información como superposiciones (Macher *et al.* 2019; Lin *et al.* 2019), los vóxeles multispectrales preservan, en la fusión, las contribuciones individuales de cada sensor. Esta conservación es crucial para identificar patologías constructivas que pueden manifestarse sutilmente en bandas específicas del espectro.

2.2. Mapas auto organizados para el análisis de vóxeles multispectrales

Los mapas auto organizados (SOM, Self-Organizing Maps) son un tipo de red neuronal artificial, de aprendizaje profundo, basada en aprendizaje no supervisado que permite reducir la dimensionalidad de datos complejos mientras preserva sus relaciones topológicas. Desarrollados por Teuvo Kohonen en los años 80 (Kohonen 1982), los SOM proyectan datos multidimensionales en una representación bidimensional de neuronas interconectadas que se organizan mediante un proceso de entrenamiento competitivo. Durante este proceso, cada neurona ajusta sus pesos para responder a patrones específicos de entrada, creando una representación donde datos similares activan neuronas próximas entre sí. Esta propiedad hace que los SOM sean particularmente valiosos para

visualizar y descubrir estructuras en datos multidimensionales, ya que permiten identificar agrupaciones naturales, transiciones graduales y anomalías en los datos sin requerir conocimiento previo sobre las clases existentes.

En el contexto del análisis de vóxeles multispectrales, los SOM resultan particularmente adecuados debido a su capacidad para manejar la naturaleza multidimensional de estos datos. Cada vóxel multispectral contiene información de múltiples bandas espectrales, configurando un vector de características de alta dimensionalidad.

La aplicación de SOM a vóxeles multispectrales ofrece ventajas significativas para el análisis de edificios históricos:

- **Clasificación no supervisada:** Los SOM permiten identificar agrupaciones naturales en los datos sin requerir conocimiento previo sobre las clases existentes, descubriendo patrones que podrían pasar desapercibidos mediante análisis manuales.
- **Visualización de relaciones multidimensionales:** La proyección bidimensional facilita la visualización de relaciones entre las diferentes características espectrales, permitiendo identificar correlaciones entre propiedades que serían difíciles de detectar en el espacio original.
- **Reducción efectiva de la dimensionalidad:** La complejidad inherente a los datos multisensor se reduce a una representación manejable, manteniendo las relaciones esenciales entre los elementos analizados.
- **Robustez frente a ruido y valores atípicos:** Los SOM muestran resistencia frente a datos ruidosos, característica valiosa cuando se integran mediciones de diferentes sensores con niveles variables de precisión.
- **Capacidad para descubrir patrones sutiles:** La naturaleza de los SOM permite detectar patrones espectrales sutiles asociados a patologías incipientes, facilitando intervenciones preventivas antes de que los daños sean visibles mediante inspección tradicional.

El análisis conjunto de estos elementos del mapa SOM permite traducir la compleja información multispectral en conocimiento accionable para la conservación del patrimonio arquitectónico, estableciendo un puente entre la adquisición de datos geomáticos avanzados y la toma de decisiones en intervenciones de restauración.

3. Caso de estudio: Iglesia visigoda de Santa María de Melque

La Iglesia de Santa María de Melque representa uno de los ejemplos más excepcionales de arquitectura altomedieval en la Península Ibérica. Situada en San Martín de Montalbán (Toledo), este templo visigodo del siglo VII d.C. destaca por su sólida construcción en sillería de granito, con bloques de gran tamaño dispuestos sin argamasa. Su planta cruciforme, con ábside cuadrangular orientado al este y un peculiar sistema de bóvedas de cañón, evidencia influencias

tanto hispanovisigodas como bizantinas (Ortega *et al.* 2017).

Los muros, de considerable grosor, presentan vanos limitados y de pequeña dimensión, resultando en un espacio interior penumbroso. Las superficies muestran diversas patologías constructivas, incluyendo áreas afectadas por humedad, eflorescencias salinas y diferentes grados de erosión, lo que convierte a este monumento en un caso de estudio ideal para la aplicación de técnicas avanzadas de documentación y análisis multisensor (Fig. 2).

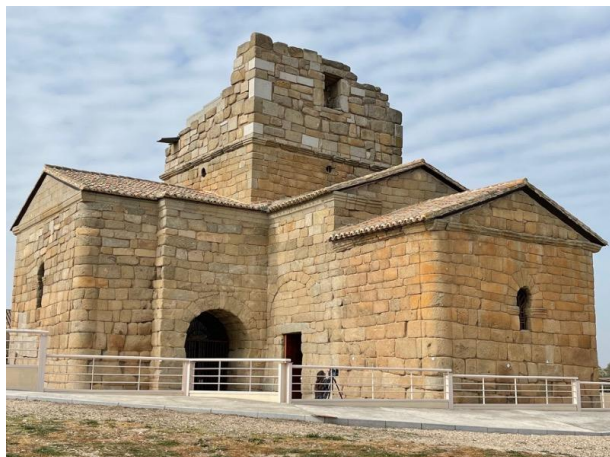


Figura 2: Vista de Santa María de Melque, desde el sureste.

3.1. Sensores empleados en la toma de datos

La selección de sensores para este estudio responde a la necesidad de capturar información complementaria en diferentes bandas del espectro electromagnético, permitiendo una documentación integral de las propiedades físicas del edificio.

Para la captura de datos en Santa María de Melque se utilizó un conjunto diversificado de sensores que abarca varias partes del espectro electromagnético. Para el rango del espectro visible, se empleó una cámara Sony NEX-7 con lente fija de 19 mm, complementada con una cámara Sony NEX-5N modificada equipada con filtros específicos para capturar información en infrarrojo cercano (850 nm) y ultravioleta (380 nm) (Berra *et al.* 2015). También se empleó un escáner láser terrestre Faro Focus S350 con tecnología de medición basada en fase en el rango del infrarrojo de onda corta (1550 nm).

Las zonas elevadas y cubiertas del edificio fueron documentadas mediante un vehículo aéreo no tripulado Parrot Anafi Thermal, equipado con un sistema dual de sensores: una cámara RGB convencional y un módulo térmico FLIR Lepton 3.5 (rango 8-14 μm) que capturó la distribución de temperatura superficial con una sensibilidad de 0,05°C. De todos estos sensores se obtuvieron distintas nubes de puntos, todas ellas georreferenciadas mediante una red de control establecida con receptores GNSS de doble frecuencia.

La combinación de sensores terrestres y aéreos permitió, en algunos casos, la cobertura total del edificio, superando limitaciones de acceso especialmente en cubiertas y elementos elevados.

4. Metodología de fusión y análisis de datos multisensor

La metodología propuesta sigue un flujo de trabajo estructurado en cuatro fases principales: adquisición de datos multisensor, procesamiento de datos y obtención de nubes de puntos, fusión de datos mediante voxelización multispectral, y análisis mediante mapas auto organizados.

4.1. Procesamiento de datos multisensor

Las imágenes RGB, NIR, UV y TIR se procesaron mediante técnicas fotogramétricas utilizando el software Agisoft Metashape. Los datos del escáner láser se procesaron mediante el software FARO SCENE. De todos los sensores mencionados se obtuvieron su nube de puntos en procesos individuales (Fig. 3).

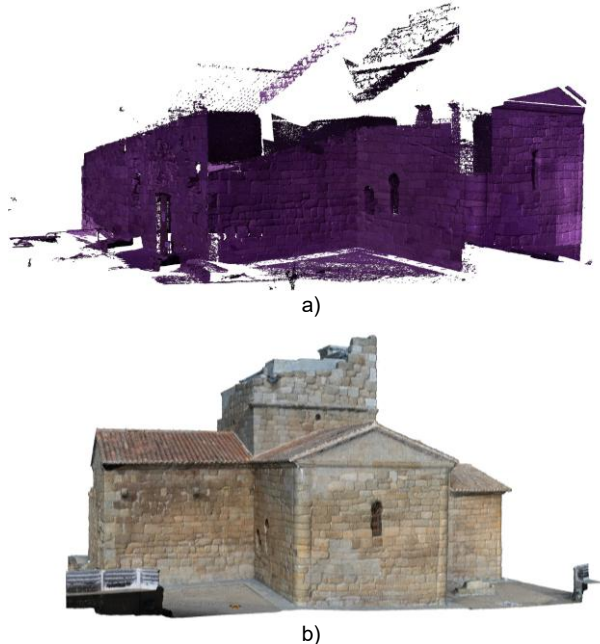


Figura 3: Ejemplo de nubes de puntos obtenidas: a) Ultravioleta UV; b) Espectro visible RGB.

4.2. Fusión de datos mediante voxelización multispectral

Para integrar toda la información disponible en una estructura de datos coherente, se empleó la técnica de voxelización multispectral:

1. Selección del tamaño de vóxel: se escogió un tamaño elemental de vóxel de 5 cm tras un análisis de las dimensiones de los elementos constructivos del edificio. Este valor representa un compromiso entre resolución espacial (capacidad para representar detalles) y eficiencia computacional. Tamaños mayores (10, 25 y 50 cm) resultaban en pérdida de información relevante en las geometrías constructivas, mientras que tamaños menores (3 cm) generaban estructuras excesivamente grandes sin aportar información adicional significativa para la posterior identificación de patologías. En la Figura 4 se muestra cómo se distribuyen las distintas bandas dentro de la estructura voxelizada de 5 cm. Los vóxeles

completos son aquellos que contienen puntos de las 7 bandas espectrales contempladas.

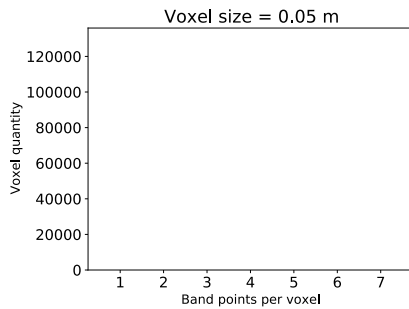


Figura 4: Histograma de vóxeles multispectrales de 5 cm, donde se muestra el número de bandas contenido respecto a la cantidad de vóxeles.

2. Proceso de voxelización: se desarrolló un algoritmo específico, implementado en lenguaje Python utilizando la biblioteca Open3D, para la voxelización de la nube RGB. Queda así establecida la estructura de vóxeles de referencia. Posteriormente, se incorporaron los datos de cada sensor adicional mediante un algoritmo de búsqueda espacial que asigna los valores espectrales de cada punto de cada una de las nubes a su vóxel contenedor. En caso de varios puntos de una misma nube contenidos por el mismo vóxel, se calculó la media de los valores espectrales como valor representativo.
3. Vóxeles multispectrales: Tras recorrer todas las nubes de puntos tenemos una estructura de vóxeles multispectrales con los siguientes atributos: coordenadas espaciales del vóxel (X, Y, Z), valores R, G y B, valor de intensidad del escáner láser (SWIR), valor NIR, valor UV y temperatura (TIR).

4.3. Análisis mediante mapas auto organizados

Para el análisis de los vóxeles multispectrales se aplicó un algoritmo de aprendizaje profundo por SOM, utilizando la biblioteca Python SOMperf (García-Tejedor and Nogales 2022), con los siguientes parámetros y justificaciones:

- a) Dimensión del mapa: En primer lugar, se aproximó el tamaño del mapa neuronal mediante la regla empírica $k = 5\sqrt{N}$, donde N es el número de elementos (vóxeles, en este caso). La dimensión óptima de la red neuronal se determinó mediante la minimización del producto topográfico (TP) en el entorno del valor sugerido de esta regla empírica. Para el tamaño de vóxel de 5 cm, con 39.052 vóxeles completos, se obtuvo un valor óptimo de 34×34 neuronas.
- b) Normalización de datos: Se aplicó una normalización min-max para homogeneizar los rangos de los diferentes atributos espectrales, evitando el sesgo hacia valores de mayor magnitud y por la heterogeneidad de las medidas espectrales durante el entrenamiento.
- c) Entrenamiento: El entrenamiento del SOM se realizó mediante la biblioteca SOMperf variando los

parámetros de tasa de aprendizaje inicial, factor de decaimiento, función de vecindad y número de épocas de entrenamiento.

- d) Evaluación: La calidad de los mapas originados se evaluó mediante su error de cuantización y su producto topográfico, medidas típicas de análisis de este algoritmo de aprendizaje profundo (Bauer *et al.* 1991; Polzlbauer 2004; Forest *et al.* 2020). Optimizadas estas medidas de error, con sus parámetros de entrenamiento, se obtuvo la representación más adecuada de los datos multidimensionales en el espacio bidimensional del mapa.

En la Figura 5 se representa el flujo de trabajo descrito de fusión por voxelización multispectral y generación del mapa auto organizado.

Para el análisis SOM, se consideraron vóxeles multispectrales que contuvieran información de todas las bandas espectrales analizadas. Esto garantiza que el análisis se realice sobre elementos con caracterización espectral completa, permitiendo identificar correlaciones entre diferentes propiedades espectrales en la misma localización espacial. El requisito no es necesariamente tener un único punto de cada sensor por vóxel, sino tener representación de cada sensor en el vóxel, independientemente del número de puntos que lo compongan. Los algoritmos de entrenamiento de mapas auto organizados son muy sensibles a valores nulos o NAN (Cottrell *et al.* 2018), motivo que justificó aún más el empleo de vóxeles multispectrales completos.

5. Resultados y discusión

La aplicación de la metodología propuesta de vóxeles multispectrales a las nubes multisensor de Santa María de Melque resultó en una significativa optimización del manejo de información. La transformación de las nubes de puntos originales en vóxeles multispectrales redujo drásticamente el volumen de datos mientras preservaba la información esencial para el análisis del edificio completo.

El proceso de voxelización con un tamaño elemental de vóxel de 5 cm produjo 46.532 vóxeles a partir del conjunto de todas las nubes de puntos originales, lo que representa aproximadamente un 0,12 % del volumen inicial de datos. Esta reducción se tradujo en un uso de memoria de sólo el 7,48 % respecto a las nubes originales, demostrando la eficiencia informática del método. La estructura resultante mantiene una resolución espacial homogénea, superando las limitaciones de densidad variable típicas de las nubes de puntos en bruto.

5.1. Análisis SOM y detección de patologías

Los SOM aplicados a los vóxeles multispectrales permiten transformar datos complejos en representaciones visuales interpretables. Entre las visualizaciones típicas de los mapas auto organizados encontramos las U-matrix donde se aprecian clústeres de neuronas (Figura 6). Las zonas claras en la matriz-U representan fronteras entre grupos (mayor distancia), mientras que las zonas oscuras indican similitud entre neuronas adyacentes.

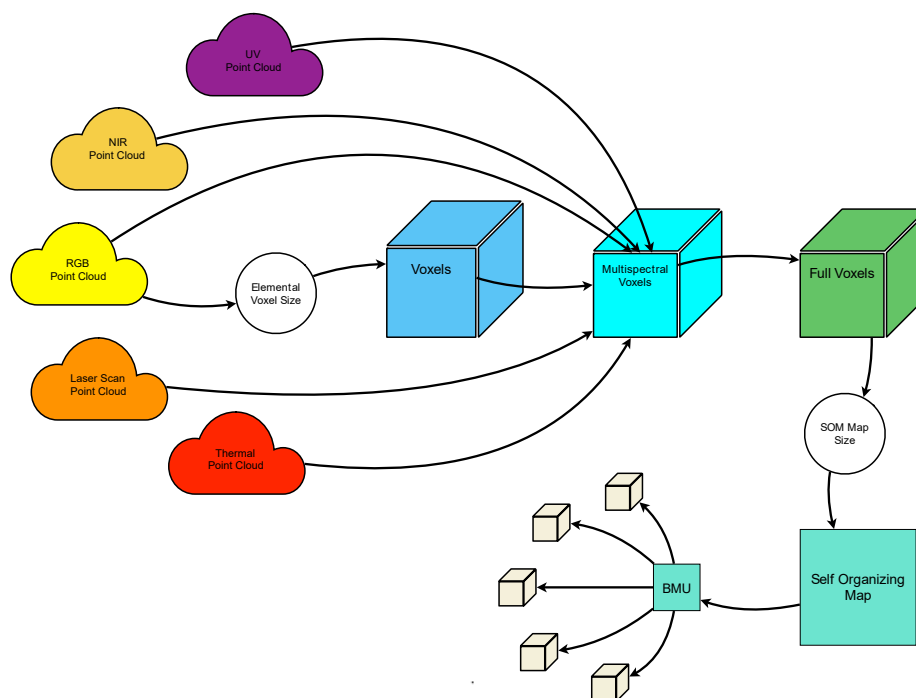


Figura 5: Diagrama de flujo donde se representa la metodología propuesta de fusión de datos por voxelización multispectral y mapas auto organizados

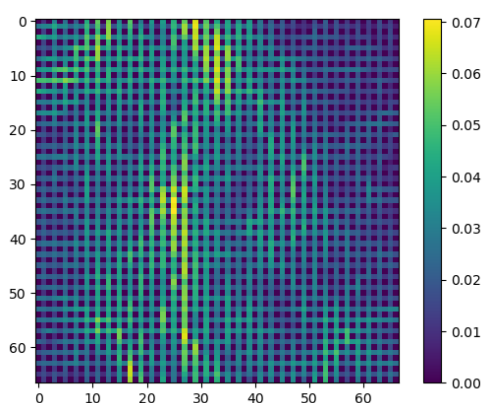


Figura 6: U-matrix correspondiente al entrenamiento de vóxeles multispectrales de 5 cm.

Los mapas de calor (Figura 7) donde se muestra el peso de cada neurona, revelan la frecuencia de activación de cada neurona, identificando los patrones más recurrentes.



Figura 7: Mapa de calor (*Heatmap*) correspondiente al entrenamiento de vóxeles multispectrales de 5 cm.

El estudio de las neuronas activadas en el mapa SOM permite identificar patrones espectrales asociados a diferentes patologías constructivas. De particular relevancia fue la activación de la región cercana a la neurona (33, 0), que respondió principalmente a vóxeles localizados en la fachada norte del edificio (Figura 8). El

análisis del vector de pesos de esta neurona (Figura 9) mostró una firma espectral característica: pesos elevados en la banda de infrarrojo de onda corta SWIR, moderados en rojo, verde, azul y UV, y mínimos en TIR.

Estudios previos sobre detección remota de patologías en edificios han demostrado que las bandas de infrarrojo de onda corta, particularmente en las longitudes de onda de 1550 nm, son especialmente efectivas para detectar humedades en diversos materiales de construcción (Del Pozo *et al.* 2016). Esta longitud de onda (1550 nm) corresponde a las bandas del infrarrojo de onda corta SWIR, onda electromagnética de trabajo del escáner laser empleado.



Figura 8: Fachada norte de Santa María de Melque, donde se aprecian patologías de humedad por capilaridad y eflorescencias salinas.

Para la detección específica de eflorescencias salinas, el análisis de los vóxeles multispectrales reveló que la combinación de bandas del espectro visible, especialmente en la región roja y verde, junto con el infrarrojo de onda corta (1550 nm) proporcionó los

mejores resultados, resultado coherente con el conocimiento científico actual (Pozo-Aguilera 2016). Las eflorescencias mostraron pesos más elevados en las bandas del espectro visible, particularmente en zonas donde las sales cristalizadas formaban depósitos blanquecinos en la superficie de los sillares graníticos.

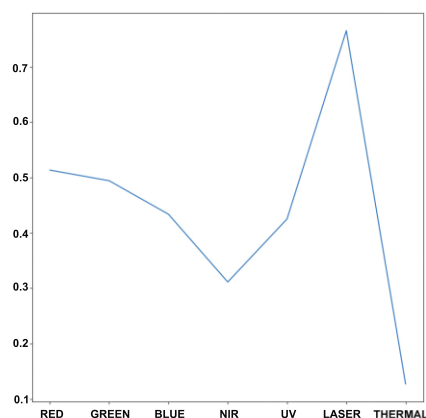


Figura 9: Firma espectral de los pesos correspondientes a la neurona (33,0).

Esta metodología confirma estos hallazgos, pero aporta una ventaja significativa: en lugar de analizar bandas espectrales de manera independiente, los vóxeles multiespectrales permiten examinar las correlaciones entre diferentes propiedades espectrales en la misma localización espacial.

Por ejemplo, esta metodología basada en vóxeles multiespectrales y mapas auto organizados presenta una notable potencial para la detección de contaminaciones biológicas en edificios patrimoniales. La estructura propuesta, con los sensores utilizados en este caso, permite integrar datos de bandas del infrarrojo cercano (NIR) y visible (rojo) para calcular índices ampliamente utilizados en el campo de la detección remota como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) directamente en el espacio tridimensional. De este modo, es posible identificar vóxeles que manifiesten valores elevados de NDVI (mayor peso de la banda NIR y pesos de la banda roja bajo), lo que correspondería a áreas afectadas por la proliferación de líquenes, musgos, algas y plantas superiores, incluso en fases iniciales donde el deterioro no resulta apreciable mediante inspección visual convencional.

Esta capacidad representaría una ventaja significativa frente a los métodos tradicionales basados en imágenes 2D típicas, ya que proporcionaría información volumétrica sobre la distribución espacial de estos agentes biodeteriorantes, permitiendo evaluar no sólo su extensión superficial, sino también su relación con características estructurales como juntas, grietas o zonas de acumulación de humedad. Esta aplicación específica ejemplifica cómo la fusión de datos multisensor mediante vóxeles y su análisis por mapas auto organizados revoluciona los protocolos de conservación preventiva en patrimonio arquitectónico.

5.2. Potencial y limitaciones

La metodología propuesta del análisis de vóxeles multiespectrales con mapas auto organizados en la fusión de datos demuestra una notable capacidad para

la detección automatizada de patologías constructivas, integrando eficientemente datos de múltiples sensores en una estructura analítica coherente. La reducción drástica en el volumen de datos sin pérdida significativa de información permite procesar edificios complejos en su totalidad incluso con recursos computacionales limitados.

Entre las limitaciones identificadas, cabe destacar la necesidad de vóxeles multiespectrales completos (con al menos un punto contenido de cada uno de los sensores) para el análisis SOM, lo que puede restringir el análisis en zonas donde algún sensor no proporcionó cobertura. Asimismo, la selección del tamaño del vóxel representa un compromiso entre resolución espacial y eficiencia computacional que debe ajustarse según las características específicas de cada edificio y el fenómeno estudiado.

6. Conclusiones

Los resultados obtenidos en Santa María de Melque evidencian que la metodología propuesta establece un nuevo paradigma en el análisis arquitectónico patrimonial. La innovadora combinación de vóxeles multiespectrales con algoritmos de aprendizaje profundo como los mapas auto organizados representa una transformación radical en la documentación y análisis del patrimonio construido. El vóxel multiespectral, como unidad fundamental de integración de datos, supera las limitaciones inherentes a las nubes de puntos tradicionales, mientras que los mapas auto organizados extraen patrones y relaciones multidimensionales imposibles de identificar mediante análisis visuales convencionales.

La eficacia demostrada para detectar automáticamente patologías como el caso de humedades y eflorescencias en la fachada norte del edificio, basándose exclusivamente en las firmas espectrales características capturadas en los vóxeles multiespectrales, abre perspectivas revolucionarias para la conservación preventiva del patrimonio. Esta metodología transforma fundamentalmente el proceso de diagnóstico arquitectónico, avanzando desde inspecciones subjetivas hacia análisis objetivos y cuantificables basados en aprendizaje profundo, estableciendo así un puente tecnológico entre la adquisición masiva de datos geomáticos y la toma de decisiones informadas en intervenciones de conservación patrimonial.

Agradecimientos

El autor quiere expresar su agradecimiento al resto de componentes del grupo de investigación Geovisualización, Espacios Singulares y Patrimonio (GESyP) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) por su apoyo intelectual y material. También agradece al Consejo General de la Arquitectura Técnica de España (CGATE) por la concesión de la beca de apoyo a doctorandos arquitectos técnicos.

Este trabajo ha sido financiado por Grupo Acre en la Fundación Premio Arce referencia FPA1900001501.

References

- ALBERTZ, J., 2002. Albrecht Meydenbauer-Pioneer of photogrammetric documentation of the cultural heritage. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **34**(5/C7), pp. 19-25.
- BAUER, H.U., PAWELZIK, K., and GEISEL, T., 1991. A topographic product for the optimization of self-organizing feature maps, in: Moody, J., Hanson, S., Lippmann, R.P. (Eds.), *Advances in Neural Information Processing Systems*. Morgan-Kaufmann.
- BERRA, E., GIBSON-POOLE, S., MACARTHUR, A., GAULTON, R., and HAMILTON, A., 2015. Estimation of the spectral sensitivity functions of un-modified and modified commercial off-the-shelf digital cameras to enable their use as a multispectral imaging system for UAVs. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.*, **40**, pp. 207–214. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-207-2015
- CODIGLIONE, M., MAZZACCA, G., and REMONDINO, F., 2024. Dimensional discoveries: unveiling the potential of 3D heritage point clouds with a robust ontology framework. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. XLVIII-2/W4-2024*, pp. 119–125. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W4-2024-119-2024
- COSTANZO, A., MINASI, M., CASULA, G., MUSACCHIO, M., and BUONGIORNO, M., 2014. Combined Use of Terrestrial Laser Scanning and IR Thermography Applied to a Historical Building. *Sensors*, **15**, pp. 194–213. DOI: 10.3390/s150100194
- COTTRELL, M., OLTEANU, M., ROSSI, F., and VILLA-VIALANEIX, N., 2018. Self-Organizing Maps, theory and applications. *Rev. Investig. Oper.*, **39**, pp. 1–22.
- DEL POZO, S., HERRERO-PASCUAL, J., FELIPE-GARCÍA, B., HERNÁNDEZ-LÓPEZ, D., RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, P., and GONZÁLEZ-AGUILERA, D., 2016. Multispectral Radiometric Analysis of Façades to Detect Pathologies from Active and Passive Remote Sensing. *Remote Sens.*, **8**, 80. DOI: 10.3390/rs8010080
- FOLEY, J.D., 1990. *Computer Graphics: Principles and Practice*. Addison Wesley.
- FOREST, F., LEBBAH, M., AZZAG, H., and LACAILE, J., 2020. A Survey and Implementation of Performance Metrics for Self-Organized Maps. *arXiv preprint arXiv:2011.058471–9*. DOI: 10.48550/arXiv.2011.05847
- GARCÍA-TEJEDOR, Á.J., and NOGALES, A., 2022. An open-source Python library for self-organizing-maps. *Softw. Impacts*, **12**, 100280. DOI: 10.1016/j.simpa.2022.100280
- GEBHARDT, S., PAYZER, E., SALEMANN, L., FETTINGER, A., ROTENBERG, E., and SEHER, C., 2009. Polygons, point-clouds, and voxels, A comparison of high-fidelity terrain representations. *Fall Simul. Interoperability Workshop 2009 2009 Fall SIW*, pp. 357–365.
- GRILLI, E., and REMONDINO, F., 2019. Classification of 3D Digital Heritage. *Remote Sens.*, **11**, 847. DOI: 10.3390/rs11070847
- INCEKARA, A.H., and SEKER, D.Z., 2018. Comparative Analyses of the Point Cloud Produced by Using Close-Range Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning for Rock Surface. *J. Indian Soc. Remote Sens.*, **46**, pp. 1243–1253. DOI: 10.1007/s12524-018-0805-z
- KOHONEN, T., 1982. Self-organized formation of topologically correct feature maps. *Biol. Cybern.*, **43**, pp. 59–69. DOI: 10.1007/BF00337288
- KUENZER, C., and DECH, S., 2013. Thermal remote sensing Sensors, Methods, Applications, in: Kuenzer, C., Dech, S. (Eds.), *Sensing and Digital Image Processing*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 287–313. DOI: 10.1007/978-94-007-6639-6
- LIN, D., JARZABEK-RYCHARD, M., TONG, X., and MAAS, H.G., 2019. Fusion of thermal imagery with point clouds for building façade thermal attribute mapping. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, **151**, pp. 162–175. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.03.010
- LUIB, A., 2019. Infrared thermal imaging as a non-destructive investigation method for building archaeological purposes. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.*, **42**, pp. 695–702. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-695-2019
- MACHER, H., BOUDHAÏM, M., GRUSSENMEYER, P., SIROUX, M., and LANDES, T., 2019. Combination of thermal and geometric information for BIM enrichment. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.*, **42**, pp. 719–725. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-719-2019
- MOROPOULOU, A., LABROPOULOS, K.C., DELEGOU, E.T., KAROGLOU, M., and BAKOLAS, A., 2013. Non-destructive techniques as a tool for the protection of built cultural heritage. *Constr. Build. Mater.*, **48**, pp. 1222–1239. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.044

- NARANJO, J.M., PARRILLA, Á., and DE SANJOSÉ, J.J., 2018. Geometric characterization and interactive 3D visualization of historical and cultural heritage in the province of Cáceres (Spain). *Virtual Archaeol. Rev.*, **9**, pp. 1–11. DOI: 10.4995/var.2018.6010
- ORTEGA, R., VANACKER, V., SANJURJO-SÁNCHEZ, J., and MIRALLES, I., 2017. Human-Landscape Interactions during the Early and High Medieval Period in Central Spain Based on New Estimates of Sediment Yield from the Melque Agricultural Complex. *Geoarchaeology*, **32**, pp. 177–188. DOI: 10.1002/gea.21582
- POLZLBAUER, G., 2004. Survey and comparison of quality measures for self-organizing maps. *Proc. Fifth Workshop Data Anal. WDA04*, pp. 67–82.
- POUX, F., NEUVILLE, R., VAN WERSCH, L., NYS, G.A., and BILLEN, R., 2017. 3D point clouds in archaeology: Advances in acquisition, processing and knowledge integration applied to quasi-planar objects. *Geosci. Switz.*, **7**, 96. DOI: 10.3390/geosciences7040096
- POZO-AGUILERA, S. DEL, 2016. Multispectral Imaging for the Analysis of Materials and Pathologies in Civil Engineering, Constructions and Natural Spaces. Universidad de Salamanca.
- RAIMUNDO, J., LOPEZ-CUERVO MEDINA, S., AGUIRRE DE MATA, J., and PRIETO, J.F., 2022. Multisensor Data Fusion by Means of Voxelization: Application to a Construction Element of Historic Heritage. *Remote Sens.*, **14**, 4172. DOI: 10.3390/rs14174172
- RAIMUNDO, J., MEDINA, S.L.C., MATA, J.A.D., HERRERO-TEJEDOR, T.R., and PRIEGO-DE-LOS-SANTOS, E., 2024. Deep Learning Enhanced Multisensor Data Fusion for Building Assessment Using Multispectral Voxels and Self-Organizing Maps. *Heritage*, **7**, pp. 1043–1073. DOI: 10.3390/heritage7020051
- SHI, G., GAO, X., and DANG, X., 2016. Improved ICP point cloud registration based on KDTree. *Int. J. Earth Sci. Eng.*, **9**, pp. 2195–2199.
- XU, Y., TONG, X., and STILLA, U., 2021. Voxel-based representation of 3D point clouds: Methods, applications, and its potential use in the construction industry. *Autom. Constr.* **126**, 103675. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103675

AN OPEN SOFTWARE PLATFORM FOR SIMULATING THE WET BULB DYNAMICS IN DRIP IRRIGATION SYSTEMS: INITIAL STEPS

PLATAFORMA DE SOFTWARE ABIERTO PARA LA SIMULACIÓN DE LA DINÁMICA DEL BULBO HÚMEDO EN SISTEMAS DE RIEGO POR GOTEO: PRIMEROS PASOS

Fernando del Águila-Rodríguez*, Ángel del Vigo

Escuela Técnica Superior de Ingeniería en Topografía, Geodesia y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, Calle Mercator 2, 28031 Madrid, Spain. , fernando.delaguila@alumnos.upm.es; , a.delvigo@upm.es

How to cite: F. del Águila-Rodríguez y Á. del Vigo. 2025. An open software platform for simulating the wet bulb dynamics in drip irrigation systems: Initial steps. En libro de actas: *Quinto Congreso en Ingeniería Geomática*. Valencia, 2 – 3 de Julio de 2025. <http://dx.doi.org/10.4995/CIGeo2025.2025.19870>

Abstract:

This work presents the initial stage of a broader project aimed at developing an open software platform that efficiently simulates the wet bulb dynamics in drip irrigation systems. The proposed approach seeks to adapt and optimize the numerical model of del Vigo *et al* (2020) into a more efficient and robust computational scheme. By refining data structures and optimizing numerical methods, the model will enable faster simulations under real-world scenarios, thus offering a powerful tool for researchers and agricultural technicians. The model will be extended in a next future to include boundary conditions such as root suction and surface evaporation that strongly affect to trickle irrigation systems. The final goal, envisioned for the doctoral thesis, is a modular backend executable in open-source format, which could be potentially complemented by a proprietary user interface for commercial applications. This initial contribution focuses on the computational aspects of model adaptation, discussing strategies to enhance simulation speed and maintain accuracy. By establishing this groundwork, the project aspires to provide a scalable solution that aids in designing, planning, and managing irrigation systems while preserving valuable water resources.

Key words: Geocomputation, Drip Irrigation, Soil Modeling, Open Source, Agriculture, Water Resources

Resumen:

Este trabajo presenta la fase inicial de un proyecto más amplio que tiene como objetivo desarrollar una plataforma de software abierto para simular y visualizar de manera eficiente e intuitiva la dinámica del bulbo húmedo en sistemas de riego por goteo. Con el modelo matemático de del Vigo *et al* (2020) como punto de partida, se ha mejorado su estructura de datos y computacional del código con objeto de hacerlo mas eficiente y robusto para las simulaciones en escenarios de aplicación real que puedan ser utilizadas por investigadores y técnicos agrícolas. Las líneas de desarrollo futuro incluirán la ampliación del modelo para incorporar condiciones de contorno propias del sistema de riego como son la succión de la raíz y la evaporación superficial. El objetivo final, planteado en la tesis doctoral, es ofrecer una plataforma de software libre con una interfaz de usuario que pueda ser utilizada futuramente para aplicaciones comerciales. En esta contribución inicial, el foco se centra en los aspectos computacionales de la adaptación del modelo, así como en las estrategias para mejorar la velocidad de las simulaciones sin comprometer la precisión. Con ello, se pretende sentar las bases de una solución escalable que contribuya al diseño, planificación y gestión óptima de los sistemas de riego, promoviendo un uso sostenible de los recursos hídricos.

Palabras clave: Geocomputación, Riego por Goteo, Modelación de Suelos, Código Abierto, Agricultura, Recursos Hídricos

1. Introduction

Efficient irrigation is indispensable in meeting the food-production demands of a growing global population while safeguarding increasingly scarce freshwater resources (Brouwer *et al.* 1988; Camp *et al.* 2000). Agriculture currently accounts for approximately 70 % of total freshwater withdrawals worldwide, and the share can exceed 90 % in arid and semi-arid regions. Within

this context, drip (or trickle) irrigation has become widely acknowledged as the most water-saving technique available for row and tree crops (Cook *et al.* 2006). By delivering small, frequent doses of water directly into the root zone, drip systems minimise non-productive losses by evaporation, runoff and deep percolation, and they improve the uniformity of solute delivery for fertigation (Thorburn *et al.* 2003; Schwartzman and Zur 1986).

* Corresponding Author: Fernando del Águila-Rodríguez, fernando.delaguila@alumnos.upm.es

Realising the full agronomic and environmental benefits of drip irrigation nevertheless hinges on accurately predicting the spatial and temporal evolution of the wetted soil volume – often referred to as the wet bulb or wetted bulb – that develops around each emitter (Bresler 1978). The shape and size of this bulb are governed by a highly coupled set of processes that include unsaturated flow, possible local saturation and surface ponding, root water uptake, and evaporation from the soil surface (Thorburn *et al.* 2003). These processes, in turn, respond non-linearly to soil hydraulic properties, emitter discharge rates, irrigation scheduling, plant growth stage and prevailing atmospheric demand (Yao *et al.* 2011). Because improper wetting can lead to localised waterlogging, salt accumulation or water stress, a quantitative description of bulb dynamics is essential for sound drip-system design, deficit-irrigation scheduling, and precision agriculture applications (Schwartzman and Zur 1986).

1.1. Modelling strategies and their limitations

Over the last five decades, researchers have pursued analytical, semi-analytical and fully numerical strategies to simulate water movement from point sources in soils (Lubana and Narda 2001). A detailed review of these models can be found in Subbaiah (2013), which categorises different techniques based on their mathematical approach and assumptions.

Early analytical solutions – typically based on simplified forms of Richards' equation or infiltration theory à la Philip – offered valuable insights but required restrictive assumptions such as homogeneous media, steady infiltration or quasi-spherical wetting fronts (Bresler 1978). Semi-analytical and empirical formulations subsequently relaxed some of these assumptions by incorporating dimensionless shape factors or field-calibrated parameters (Cook *et al.* 2006). In contemporary practice, however, numerical models that solve Richards' equation directly in two or three dimensions have become the de facto standard because they can accommodate arbitrary soil-hydraulic functions, transient boundary conditions and root uptake sinks (Farthing and Ogden 2017). Within this class, the van Genuchten-Mualem constitutive model remains the most common choice for describing the soil-water retention curve and unsaturated hydraulic conductivity (van Genuchten 1980; Mualem 1976).

Despite their accuracy and versatility, state-of-the-art numerical models are computationally demanding, particularly when simulations must resolve steep moisture gradients, abrupt saturation transitions or long irrigation seasons with fine temporal resolution (Farthing and Ogden 2017). Stability criteria (e.g. the Courant-Friedrichs-Lewy condition) often force the time step to shrink dramatically under highly non-linear conditions, and large-scale three-dimensional meshes can entail solving millions of coupled, non-linear algebraic equations at each step. Consequently, practical turnaround times can be prohibitive for iterative design tasks, real-time decision support or ensemble runs in optimisation frameworks.

Another barrier to widespread adoption is limited access to open-source, community-driven codes. Commercial

packages – most notably HYDRUS-2D/3D – are robust, extensively validated and user-friendly, yet their licence fees and closed source restrict their use in many academic, governmental and small-enterprise settings (Šimůnek *et al.* 2016). Even when licences are available, tailoring the code to incorporate novel boundary conditions (e.g. dynamic root uptake functions or coupled heat transport) or to embed the solver into larger workflows can be cumbersome (Šimůnek *et al.* 2016).

The community therefore faces a dual need: computational speed and open accessibility.

1.2. Scope and objectives of the present and future work

The work presented here constitutes the first phase of a larger doctoral project that seeks to create a fully modular, open-source platform for simulating drip-irrigation hydraulics and soil-plant-atmosphere interactions.

Specifically, this contribution concentrates on the computational adaptation and acceleration of the explicit finite-difference formulation introduced by del Vigo *et al.* (2020).

Our future goals are:

- to refactor data structures and parallelise key kernels so that execution times decrease by at least an order of magnitude relative to the original sequential code;
- to validate numerical stability and mass-balance accuracy under highly non-linear, transient infiltration scenarios representative of coarse-textured and fine-textured soils; and
- to establish a clean, documented code base that can enable researchers to easily include additional physical processes such as root suction, surface evaporation and solute transport in a plug-in fashion.

Thus, experimental validation and full soil-plant-atmosphere coupling will be addressed in future works.

By delivering a fast and transparent computational core, we lay the groundwork for a scalable framework that can drive both research prototypes and eventual commercial front ends for practitioners. In doing so, we aim to accelerate methodological innovation, lower the entry barrier for resource-constrained institutions, and foster reproducibility in soil-water research.

2. Comparative context within the modelling literature

Several open-source (and widely used proprietary) simulation frameworks already address variably-saturated flow in porous media, yet each serves a broader mandate than the drip-irrigation wet-bulb problem targeted here:

- PFLOTRAN is a massively-parallel Fortran code for multiphase, multicomponent subsurface flow and reactive transport; its strength lies in high-performance computing for metre to kilometre-scale

geologic systems, whereas the present Python solver prioritises light-weight execution on desktop hardware and axisymmetric resolution of near-surface point infiltration (PFLOTTRAN 2021).

- OpenFOAM (e.g. the porousMultiphaseFoam toolbox) provides general finite-volume CFD capabilities, including Richards and Darcy-type solvers on unstructured 3D meshes. However, its compilation workflow and large-mesh overhead make rapid what-if analyses for emitter design cumbersome compared with the streamlined explicit finite-difference kernel used here (OpenCFD Ltd 2025).
- Landlab offers modular Python components (e.g. Green-Ampt infiltration) for catchment-scale geomorphic and hydrologic processes, but it operates on planar grids and is not geared to capture the radial, centimetre-scale wetting patterns that govern drip efficiency (Landlab 2025).
- OpenGeoSys 6 simulates coupled thermo-hydro-mechanical-chemical (THMC) processes in fractured or regional aquifer systems via rich XML workflows; this breadth entails heavier pre-/post-processing and computational loads than the dedicated, emitter-centric platform introduced here (OpenGeoSys 2025).
- HYDRUS-2D/3D remains a benchmark for variably-saturated flow and solute transport, but its closed-source licensing and fee structure limit community-driven extension; the platform proposed in this article fills this accessibility gap while preserving comparable physical Fidelity (PC-PROGRESS 2021).

Together, these comparisons underscore the novelty of the proposed open-source framework: it will deliver a purpose-built, computationally efficient tool that bridges the scale and accessibility gaps left by more general-purpose or proprietary codes, thereby advancing drip-irrigation research and practice.

3. Materials and methods

3.1. Theoretical background and baseline solver

Water movement from a point or disc emitter is governed by the axisymmetric Richards equation in cylindrical coordinates (Eq. 1):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r K \frac{\partial H}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial H}{\partial z} \right) \quad (1)$$

where the total head $H = h + z$ combines matric head h and elevation z , $K(\theta)$ is the unsaturated hydraulic conductivity, and θ the volumetric water content. Throughout this work, we employ the van Genuchten-Mualem constitutive relationships for $\theta(h)$ and $K(\theta)$.

Del Vigo et al. (2020) implemented an explicit forward-Euler finite-difference discretisation of this equation on a uniform $r - z$ grid, achieving second-order accuracy in time for optional tests and first-order in space. Because the problem is radially symmetric, the 3D flow field is reduced to a 2D mesh, greatly lowering memory requirements.

A full derivation and validation of the original MATLAB solver are provided in the bibliography (del Vigo et al. 2019; 2020). Here, we summarise only those elements needed to motivate our refactoring and benchmarking effort.

3.2. Performance limitations of the MATLAB implementation

Although the finite-difference routine of del Vigo et al. (2020) represents an elegant proof-of-concept, several points may be improved in order to achieve a higher computational performance.

3.2.1. CFL-driven micro-time steps

Stability of an explicit scheme mandates a time-step that scales with the square of the mesh spacing and inversely with the saturated conductivity K_s . Del Vigo et al. (2020) derive an upper bound (Eq. 2):

$$\Delta t < \frac{\theta_s \Delta s^2}{8000 K_s}, \quad (2)$$

expressed in their Eq. (17).

For a coarse-textured soil with $K_s = 1.7 \times 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$ and $\Delta s = 2.5 \text{ mm}$, Δt collapses to $1.3 \times 10^{-3} \text{ s}$. A one-hour irrigation therefore entails over 2.7 million timesteps, each requiring a full stencil sweep over the grid.

While the authors introduce an ad-hoc rule that gradually relaxes Δt as wetting fronts flatten, the gain is modest because the early-time dynamics remain the cost-dominating phase.

3.2.2. Uniform grid and manual domain growth

The mesh is uniform in both r and z , and extends far enough that the wetting front never reaches the outer boundaries. When that estimate fails, a manual grid-extension routine doubles the radial domain as soon as the puddle radius r_{moj} touches the edge. Re-allocating and copying large 2D arrays at run time incurs a noticeable pause and breaks cache continuity.

Because the refinement is global, cells located well outside the zone of steep gradients are updated at the same frequency as those close to the emitter, wasting both floating-point operations and memory bandwidth.

3.2.3. Interpreter overhead and single-thread execution

The reference code is executed in a MATLAB environment. Consequently, every arithmetic kernel is interpreted and confined to a single CPU core unless tools like the proprietary "Parallel Computing Toolbox" are employed. Profiling a 24×24 grid (the authors' default) shows that $> 85\%$ of the runtime is spent inside the innermost update loop even when vectorised, because MATLAB cannot fuse the stencil into a contiguous SIMD load/store sequence.

3.2.4. Memory layout and cache traffic

State variables (i.e.: mh , mk , mq ...) are held in separate *double* matrices, following MATLAB's default column-major order. Each stencil update therefore

streams four to six arrays through the cache hierarchy for every node visited, with poor spatial locality. On a contemporary workstation (e.g. DDR4-2933), achievable memory bandwidths of around 40GB per second becomes the limiting factor once the grid exceeds around 100,000 nodes – long before the floating-point pipeline is saturated.

3.2.5. Aggregate impact on turnaround time

Combining the micro time-step, macro uniform mesh and serial, memory-bound execution, leads to end-to-end wall-clock times which result impractical for design optimisation or ensemble uncertainty analyses.

These limitations motivated our decision to re-engineer the solver as a first step, while trying to retain the conceptual transparency of the original algorithm.

3.3. Language selection: balancing raw speed with openness and extensibility

A central objective of the doctoral project is to deliver software that other researchers can read, modify, and extend – for example to add root-uptake routines, coupled heat transport, or salinity modules. That requirement rules out choosing a language solely on the basis of peak computational power, as we must weigh development effort, learning curve, licensing cost, and community adoption against execution speed.

At one end of the spectrum lie fully compiled languages such as C, C++ and modern Fortran. When loops perform only scalar operations those languages routinely out-run naïve Python or MATLAB by one to two orders of magnitude, because mature compilers emit highly tuned AVX or AVX-512 vector instructions and schedule memory traffic efficiently (Arabas *et al.* 2014). Yet that raw speed carries a price. Researchers unfamiliar with build systems and memory management face a steep learning curve (Hutton *et al.* 2016), and each scientific experiment must pass through the compile-link-run cycle; the friction discourages rapid hypothesis testing. Extending a monolithic executable with new physics typically demands recompilation of the entire solver, which hampers the “plug-in” culture at the heart of this project.

MATLAB occupies the opposite niche. Its interactive syntax, integrated plotting and BLAS-optimised array algebra make it superb for rapid prototyping (Arabas *et al.* 2014). Nonetheless, any engine that depends on MATLAB obliges downstream users to purchase licences, and most acceleration paths (multi-thread execution, GPU arrays, distributed memories) are hidden behind additional proprietary toolboxes. Even when those toolboxes are available, the interpreter imposes overhead: unless loops are fully vectorised, they execute an instruction at a time on a single core (Bartman *et al.* 2022), and the “Parallel Computing Toolbox” merely raises that ceiling to the number of cores detected on the host machine. These factors are incompatible with the goal of a freely redistributable framework.

Python emerges as a pragmatic compromise. It shares MATLAB’s gentle learning curve but is released under permissive open-source licences and now dominates geocomputational hydrology, as illustrated by packages

such as HydroMT and Landlab (Adams *et al.* 2017; Eilander *et al.* 2025).

The language’s scientific stack (NumPy, SciPy, Pandas and Jupyter) not only shortens the path from concept to runnable notebook but also satisfies modern reproducibility mandates. When performance becomes critical, Python’s shortcomings at the interpreter level can be bypassed. Vectorised kernels expressed with NumPy already approach the memory-bandwidth ceiling of many-core CPUs; Just-In-Time compilation through Numba or Pythran translates explicit loops into native AVX-512 machine code (Lam *et al.* 2015; Bartman *et al.* 2022), narrowing the gap to hand-tuned C to roughly fifty per cent for stencil workloads. Where arithmetic intensity warrants it, the same kernels can be off-loaded to GPUs with CuPy or JAX, often yielding order-of-magnitude accelerations (Lam *et al.* 2015).

Parallel scaling across nodes is supported by Dask and MPI4Py, and the forthcoming free-threaded build of CPython 3.13, in which the global interpreter lock is removed, is already demonstrating linear speed-ups on synthetic benchmarks (Gross 2023). Should individual routines still prove to be bottlenecks, Cython or pybind11 allows those hotspots to be replaced with fully compiled extensions without altering the high-level interface that users and plug-ins rely on.

Taken together, these considerations suggest that Python provides the best trade-off between computational efficiency and long-term sustainability. It can deliver sub-minute runtimes for the grid sizes typical of drip-irrigation design while preserving the openness, modularity and ease of adoption required for a community platform. For specialised applications that demand even higher throughput, the modular design described in the following subsection will allow research groups to swap in compiled back-ends yet continue to benefit from the same Python-level orchestration and post-processing tools.

3.4. New architectural proposal

The platform has been reorganised into five self-contained Python packages, each of which can be replaced or extended without touching the others. This separation of concerns is essential if the code is to mature into a community framework rather than remain a single-purpose script.

3.4.1. Soil-property handler

Del Vigo *et al.* (2020) hard-wired the twelve USDA textural classes published by Carsel and Parrish in 1988, an expedient choice at the time but one that is now overly restrictive. In the new architecture, hydraulic functions are provided through a registry of soil objects. Each object encapsulates the full van Genuchten-Mualem parameter set together with bulk density, residual water content and any meta-data required for future multiphase extensions. Users may import parameters directly from pedo-transfer tools such as Rosetta, supply laboratory fits, or curate their own libraries; the only requirement is that the object implements the types defined in the JSON classes. Because Rosetta itself is open-source, integrating it as an optional plug-in will require little more than exposing its command-line interface to the registry.

3.4.2. Simulation descriptor

All run-time knobs – emitter discharge, irrigation duration, initial moisture profile, boundary conditions, spatial discretisation – are serialised into a simulation descriptor written in human-readable format. The descriptor can be parsed by any component, paving the way for job schedulers, parametrisation loops or cloud services that submit ensembles to a cluster. By keeping input data orthogonal to code, the design lays a foundation for a formal application-programming interface through which external modules will negotiate resources, checkpoints and callbacks.

3.4.3. Solver kernel

The numerical core has been ported almost verbatim from the original MATLAB routine, thereby preserving its explicit finite-difference logic and validation pedigree. Indexing and array strides, however, had to be rewritten because MATLAB stores matrices column-major and Python (NumPy) defaults to row-major. State variables are now kept in structure-of-arrays layout, which aligns with contiguous memory blocks and facilitates vectorisation under Numba. The kernel therefore remains recognisably the del Vigo algorithm but is packaged as a discrete, importable module; future work will enable researches to swap in semi-implicit or finite-volume solvers without disturbing the remaining codebase. In future steps, hooks for plug-ins – root uptake, surface evaporation, solute transport – will be exposed through a lightweight event system that inserts additional source or sink terms just before each time step is committed.

3.4.4. Visualisation layer

All plotting and export routines have been moved out of the solver and into a dedicated package that serves both static and interactive front ends. Conventional figures (wet-bulb isochrones, cumulative infiltration curves) are rendered with Matplotlib. At the time of writing this article, a proof-of-concept WebGL viewer is being developed to stream NumPy arrays to an in-browser JavaScript canvas so that users can watch a simulation progress in real time. Because this layer interfaces only with snapshots written by the solver, alternative clients – such as dashboard widgets or VR visualisers – can evolve independently.

3.4.5. Adaptive time-step and domain control (CFL)

The Courant-Friedrichs-Lewy logic that enlarges the computational domain on demand is one of the most intricate portions of the original code and therefore has been isolated in its own package. That component has not yet been re-implemented in Python; doing so will be the subject of a follow-on study that will benchmark alternative strategies (dynamic mesh refinement, nested grids, octrees) under contrasting soil textures and irrigation regimes. By cordoning off the adaptive machinery, we avoid entangling premature optimisations with the baseline port and leave room for domain-specific innovations contributed by other groups.

This modular arrangement satisfies three long-term requirements: it keeps the learning curve shallow for

new users, it invites community extensions through well-defined interfaces, and it allows performance-critical segments to be replaced or accelerated without invalidating the reference implementation.

3.5. Testing for consistency

To verify that the Python port is numerically identical to the reference implementation, every test case published by del Vigo *et al.* (2020) was executed in both codes with precisely matching soil parameters, boundary conditions, grid resolution, and stopping criteria. Rather than relying on visual overlays of wet-bulb contours – which would be unreliable because MATLAB and Python employ different contouring algorithms and default interpolation schemes – the comparison was performed cell by cell on the final volumetric-water-content matrix.

Because the original MATLAB routine had already been validated against analytical solutions and the HYDRUS-2D/3D finite-element code, an exact reproduction of its numerical fields is a sufficient proof of correctness for the present stage.

4. Results

4.1. Computational performance

For the purpose of benchmarking the Python code's performance against the previous MATLAB implementation, the code was executed in a number of different scenarios using a modern workstation, under the Windows 11 Pro Operating System (23H2 version).

The machine uses a 13th Gen Intel Core i7-1360P CPU running at 2.20 GHz, and 32GB of DDR5 RAM running at 5200 MT/s, although it is important to note the program never surpassed 1.8GB in memory utilisation under any conditions.

Table 1 summarises the configuration parameters utilised for the benchmarking tests under each scenario. The “grid size” parameter – as defined in the original MATLAB implementation – represents the number of cells in the r and z axes, forming a perfect two-dimensional square of simulated soil. Each cell represents an area of 25mm^2 (5-milimeter-sided squares).

Table 1: Benchmark scenarios' configurations. Irrigation caudal is always $50\text{ cm}^3/\text{min}$.

Scenario	Soil type (USDA classification)	Duration of irrigation (min)	Duration of simulation (min)	Grid size (n° cells)
1	sand	1	3	24
2	sand	5	5	24
3	loamy sand	1	3	24
4	loamy sand	5	5	24
5	sandy clay	1	3	24
6	sandy clay	5	5	24
7	sand	1	3	100
8	sand	5	5	100

Table 2 summarises wall-clock times for eight benchmark scenarios; almost every case completes in Python in less than half the time required by MATLAB. The only code-level change responsible for this improvement is the relocation of state variables into a structure-of-arrays layout that promotes contiguous memory access under NumPy.

Table 2: Wall-clock times for MATLAB vs. Python benchmark scenarios.

Scenario	MATLAB execution time (s)	Python execution time (s)
1	42.65	19.65
2	144.26	63.46
3	32.83	13.32
4	82.98	49.94
5	37.83	20.00
6	40.96	22.03
7	662.40	303.42
8	2724.21	1001.01

Even in its present, essentially “naïve” form, with no Just-In-Time (JIT) compilation, no explicit thread parallelism, and none of the data-layout optimisations outlined in previous sections, the Python translation executes markedly faster than the original MATLAB routine.

Nonetheless, in order for this program to be useful in a real-world scenario (e.g. for efficient irrigation design in agriculture), hundreds or thousands of daily simulations would need to be undertaken to account for the changing conditions of the soil and plant. To enable this, the code still needs to be optimised to a point where computation time is not an obstacle.

Because none of the planned accelerators – Numba or Pythran JIT kernels, OpenMP pragmas, adaptive time-step control, or GPU off-loading – have yet been activated, the current speed-ups should be regarded as a lower bound. Conservative estimates based on micro-benchmarks of the stencil update suggest that a further ten-fold reduction in runtime, at least, is attainable once those measures are in place.

4.2. Simulations’ consistency with legacy script

Across eleven scenarios that span surface emitters, infiltration and redistribution phases, and coarse-textured to fine-textured soils, the root-mean-square deviation in θ never exceeded 2×10^{-6} , and cumulative mass balance differed by less than 0.01 %. Front positions matched to within a single grid spacing.

Minor differences in printed output – apparent as an increased number of significant digits – stem only from the fact that Python, through NumPy, retains the full IEEE-754 double-precision representation, whereas MATLAB truncates displayed values by default. No substantive deviation in physical results was observed when the time step was halved or the grid refined, confirming that the Python solver is a mathematically faithful, drop-in replacement for the original code.

5. Citations and references

This contribution demonstrates that the explicit finite-difference mode of del Vigo *et al.* (2020) – originally implemented in MATLAB – can be migrated to a modern, fully open-sourced stack, without sacrificing numerical fidelity and while already delivering a consistent speed-up of roughly a factor of two to three. The port required only modest refactoring of data structures yet reproduced the legacy code’s water-content fields preserving mass balance to better than 0.01 %. These results confirm that the Python solver is a mathematically accurate, drop-in replacement for the reference implementation.

Beyond the immediate performance gains, the work establishes a scalable and extensible architecture centred on five decoupled packages that separately handle soil data, simulation descriptors, the solver kernel, visualisation, and adaptive CFL control. Effort was invested not only in code translation but also in a thorough evaluation of language options, bottleneck analysis, and interface design, thereby laying the most robust possible foundations for a community platform. The resulting modular layout allows individual components to be replaced or augmented – whether by alternative solvers, pedotransfer functions such as Rosetta, or new physical processes – without ripple effects across the codebase.

The roadmap for the next development cycle is clear. Priority will be given to incorporating advanced acceleration techniques – Numba or Pythran JIT compilation, multicore parallelism via OpenMP, and optional GPU off-loading – to achieve the order-of-magnitude runtime reduction indicated by micro-benchmarks. In parallel, the Courant-Friedrichs-Lewy module will be re-engineered as a plug-in that offers user-selectable strategies for dynamic domain growth and local mesh refinement. Finally, well-documented hooks will be added so that routines for root-water uptake, surface evaporation, solute transport and other boundary processes can be integrated seamlessly.

Taken together, these milestones will convert the present prototype into a fully-fledged, open-source platform for wet-bulb simulation – one capable of underpinning both academic research and practical decision-support tools aimed at maximising water-use efficiency in drip-irrigated agriculture.

Future works should address experimental validation and full soil-plant-atmosphere coupling, as these are outside the scope of this article.

6. Codebase

Once the current codebase has been properly documented and prepared for distribution, a repository will be made available to the public under the URL: <https://open-source.agroint.es>.

This address will include all the relevant information about licensing and terms of use.

Acknowledgements

We would like to acknowledge the support provided by Agrountel for this work, particularly the contributions of computer technician Alberto Otero Núñez.

References

- ADAMS, J.M., GASPARINI, N.M., HOBLEY, D.E.J., TUCKER, G.E., HUTTON, E.W.H., NUDURUPATI, S.S., and ISTANBULLUOGLU, E., 2017. The Landlab v1.0 OverlandFlow component: a Python tool for computing shallow-water flow across watersheds. *Geoscientific Model Development*, **10**(4), pp. 1645–1663. DOI: 10.5194/gmd-10-1645-2017
- ARABAS, S., JARECKA, D., JARUGA, A., and FIJAŁKOWSKI, M., 2014. Formula translation in Blitz++, NumPy and modern Fortran: A case study of the language choice tradeoffs. *Scientific Programming*, **22**(3), pp. 201–216. DOI: 10.3233/SPR-140379
- BARTMAN, P., BANAŚKIEWICZ, J., DRENDA, S., MANNA, M., OLESIK, M.A., ROZWODA, P., SADOWSKI, M., and ARABAS, S., 2022. PyMPDATA v1: Numba-accelerated implementation of MPDATA with examples in Python, Julia and Matlab. *Journal of Open Source Software*, **7**(77), 3896. DOI: 10.21105/joss.03896
- BRESLER, E., 1978. Analysis of trickle irrigation with application to design problems. *Irrigation Science*, **1**(1), pp. 3–17. DOI: 10.1007/BF00269003.
- BROUWER, C., PRINS, C., KAY, M. and HEIBLOEM, M., 1988. *Irrigation Water Management: Irrigation Methods. FAO Training Manual No. 5. Rome: Food and Agriculture Organization*, 91 pp.
- CAMP, C.R., LAMM, F.R., EVANS, R.G. and PHENE, C.J., 2000. Subsurface drip irrigation – past, present and future. In: *Proceedings of the 4th Decennial National Irrigation Symposium*, Phoenix (AZ), 14–16 November 2000. St Joseph (MI): American Society of Agricultural Engineers, pp. 363–372.
- COOK, F.J., FITCH, P., THORBURN, P.J. and BRISTOW, K.L., 2006. Modelling trickle irrigation: comparison of analytical and numerical models for estimation of wetting-front position with time. *Environmental Modelling & Software*, **21**(9), pp. 1353–1359. DOI: 10.1016/j.envsoft.2005.04.018.
- DEL VIGO, Á., 2020. *Simulación del flujo del agua en el suelo en riego por goteo superficial, soluciones analíticas aproximadas, caracterización del suelo y diseño de los riegos*. PhD. Thesis, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. DOI: 10.20868/UPM.thesis.63840.
- DEL VIGO, Á., ZUBELZU, S., and JUANA, L., 2019. Study of water infiltration in soil by Richards equations in 3D: summary and methodology validation. *11th World Congress on Water Resources and Environment*. Madrid. Spain. Available: http://ewra.net/pages/EWRA2019_Proceedings.pdf. [6/30, 2025].
- DEL VIGO, Á., ZUBELZU, S., and JUANA, L., 2020. Numerical routine for soil water dynamics from trickle irrigation. *Applied Mathematical Modelling*, **83**, pp. 371–385. DOI: 10.1016/j.apm.2020.01.058.
- EILANDER, D., BOISGONTIER, H., BOUAZIZ, L. J. E., BUITINK, J., COUASNON, A., DALMIJN, B., HEGNAUER, M., DE JONG, T., LOOS, S., MARTH, I., and VAN VERSEVELD, W., 2025. HydroMT: Automated and reproducible model building and analysis (v0.10.1) [Computer software]. *Deltares*. DOI: 10.5281/zenodo.14931711.
- FARTHING, M.W. and OGDEN, F.L., 2017. Numerical solution of Richards' equation: a review of advances and challenges. *Soil Science Society of America Journal*, **81**(6), pp. 1257–1276. DOI: 10.2136/sssaj2017.02.0058.
- GROSS, S., 2023. PEP 703 – Making the Global Interpreter Lock Optional in CPython | [peps.python.org](https://peps.python.org/pep-0703/). Available: <https://peps.python.org/pep-0703/>. [6/30, 2025].
- HUTTON, C., ET AL., 2016. Most computational hydrology is not reproducible, so is it really science? *Water Resources Research*, **52**(10), pp. 7548–7555. DOI: 10.1002/2016WR019285
- LAM, S. K., PITROU, A., and SEIBERT, S., 2015. Numba: A LLVM-based Python JIT compiler. *Proceedings of the 2nd Workshop on the LLVM Compiler Infrastructure in HPC*. DOI: 10.1145/2833157.2833162
- LANDLAB, 2025. Landlab. Available: <https://landlab.csdms.io/> [6/30, 2025].
- LUBANA, P.P.S. and NARDA, N.K., 2001. Modelling soil-water dynamics under trickle emitters: a review. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **78**(3), pp. 217–232. DOI: 10.1006/jaer.2000.0636.
- MUALEM, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, **12**(3), pp. 513–522. DOI: 10.1029/WR012i003p00513.
- OPENCDF LTD, 2025. OpenFOAM. Available: <https://www.openfoam.com/> [6/30, 2025].
- OPENGEOSSYS, 2025. OpenGeoSys 6. Available: <https://www.opengeosys.org/> [6/30, 2025].
- PC-PROGRESS, 2021. HYDRUS-2D/3D. Available: <https://www.pc-progress.com/> [6/30, 2025].

- PFLOTRAN, 2021. PFLOTRAN. Available: <https://www.pfotran.org/> [6/30, 2025].
- SCHWARTZMAN, M. and ZUR, B., 1986. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **112**(3), pp. 242-253. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(1986)112:3(242).
- ŠIMŮNEK, J., VAN GENUCHTEN, M.Th. and ŠEJNA, M., 2016. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages. *Vadose Zone Journal*, **15**(7). DOI: 10.2136/vzj2016.04.0033.
- SUBBAIAH, R., 2013. A review of models for predicting soil water dynamics during trickle irrigation. *Irrig. Sci.*, **31**, pp. 225–258. DOI: 10.1007/s00271-011-0309-x
- THORBURN, P.J., COOK, F.J. and BRISTOW, K.L., 2003. Soil-dependent wetting from trickle emitters: implications for system design and management. *Irrigation Science*, **22**(3-4), pp. 121-127. DOI: 10.1007/s00271-003-0068-4.
- VAN GENUCHTEN, M.Th., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, **44**(5), pp. 892-898. DOI: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x.
- YAO, W.W., MA, X.Y., LI, J. and PARKES, M., 2011. Simulation of point-source wetting pattern of subsurface drip irrigation. *Irrigation Science*, **29**(4), pp. 331-339. DOI: 10.1007/s00271-010-0239-1.

EVALUATING THE PERFORMANCE OF POPULAR GRAPH SEARCH ALGORITHMS FOR SHORTEST PATH ANALYSIS IN SPATIAL DATABASES

EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE ALGORITMOS POPULARES DE BÚSQUEDA EN GRAFOS PARA EL ANÁLISIS DE LA RUTA MÁS CORTA EN BASES DE DATOS ESPACIALES

Julio Armando Cuellar-Gutiérrez*, Calimanut Ionut Cira, Miguel Ángel Manso-Callejo

Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía, E.T.S.I. en Topografía, Geodesia y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, C/ Mercator 2, 28031 Madrid, Spain. , julio.cuellar@alumnos.upm.es; , ionut.cira@upm.es; , m.manso@upm.es

How to cite: J.A. Cuellar-Gutiérrez, C.I. Cira y M.Á. Manso-Callejo. 2025. Evaluating the performance of popular graph search algorithms for shortest path analysis in spatial databases. En libro de actas: *Quinto Congreso en Ingeniería Geomática*. Valencia, 2 – 3 de Julio de 2025. <http://dx.doi.org/10.4995/CIGeo2025.2025.19872>

Abstract:

Establishing Shortest Path (SP) routes between points using spatial databases is a fundamental challenge in the field of engineering, especially in the sciences of applied geomatics, as finding shorter routes not only helps to improve times but is also a tool that optimizes resources and significantly improves decision-making in fields related to geomatics engineering. The applications of this task range from urban planning to shipping, transport, and traffic planning, among others. In this work, five popular graph search algorithms applied on routes downloaded in vectorial format from OpenStreetMap (OSM) are applied to assess their performance. The goal is to determine the advantages and disadvantages of each algorithm, their computational behaviors, and understand which of these will be better in applications of different projects of geomatic and computational sciences identify which algorithm optimize spatial database information for urban mobility modeling and for geospatial networks at different scales. The study will also highlight the trade-offs between computational cost and path accuracy in route computation.

Key words: Shortest route, Graph search algorithms, Computational cost, Performance assessment

Resumen:

Establecer rutas de tipo “Camino más corto” entre puntos utilizando bases de datos espaciales es un desafío fundamental en el campo de la ingeniería, especialmente en las ciencias de la geomática aplicada, ya que encontrar rutas más cortas no solo ayuda a mejorar los tiempos, sino que también es una herramienta que optimiza recursos y mejora significativamente la toma de decisiones en campos relacionados con la ingeniería geomática. Las aplicaciones de esta tarea van desde la planificación urbana hasta el envío, el transporte y la planificación del tráfico, entre otros. En este trabajo, se aplicaron cinco algoritmos populares de búsqueda de grafos en rutas descargadas en formato vectorial de OpenStreetMap (OSM) para evaluar su rendimiento. El objetivo es determinar las ventajas y desventajas de cada algoritmo, su comportamiento computacional y comprender cuál será más eficaz en aplicaciones de diferentes proyectos de geomática y ciencias computacionales. Además, identificará qué algoritmo optimiza la información de bases de datos espaciales para el modelado de movilidad urbana y para redes geoespaciales a diferentes escalas. El estudio también destacará las compensaciones entre el costo computacional y la precisión de la ruta en el cálculo de rutas.

Palabras clave: Ruta más corta, Algoritmo de búsqueda de grafos, Costo computacional, Evaluación de rendimiento

1. Introduction

With advancements in the study of SP, numerous algorithms have been developed to address this issue and provide more efficient solutions. However, there is a lack of evidence regarding the efficiency of these algorithms in scenarios involving more than two nodes, uncontrolled distances, OpenStreetMap data, or spatial databases. This limitation hinders a comprehensive understanding of the most effective algorithms for spatial

data analysis (Kairanbay 2013) or the analysis of transport or road networks (Huang *et al.* 2022).

In this study, we employ standard geometric and geomatic science tools to verify SP algorithms, each tailored and optimized for their specific scientific context. Our research culminates in a comparative analysis of six of the most widely used algorithmics: Dijkstra (DJ) (Dijkstra 1959), A* (A*), Bellman-Ford (BF) (Mukhlif and Saif 2020), Johnson (JOH) (Johner *et al.* 2022), Bidirectional Dijkstra (BDD), and Bidirectional A* (BDA)

* Corresponding Author: Julio Armando Cuellar-Gutiérrez, julio.cuellar@alumnos.upm.es

(Stanford University 2017), providing insights into their performance across different scenarios.

These algorithms will be applied to OSM data and spatial databases extracted from the streets of Madrid, Spain. The performance of each method will be evaluated using various points with random tools, with distances ranging up to one and twenty-five kilometers, involving hundreds of connections, nodes, and different random calculations of SP routes.

The objective is to analyze performance, distance efficiency, computational costs, and the real efficiency of each algorithm. Computational efficiency was measured by the number of nodes, distance, processing time (total time taken by the algorithm to complete its task) (seg), memory consumption (MB), processing time (seg), and the number of operations in each case (Chunata *et al.* 2019). Then identify which algorithm performs best for spatial data applications using spatial databases.

For this, it will be experimented with which algorithms are more effective in spatial database applications. We will analyze the behavior of each algorithm and its ability to generate paths with random and specific data. With this analysis, a generalization of existing algorithms for the investigation of shorter paths in future studies is pursued.

2. Data and methods

2.1. OpenStreetMap

In the study, OSM data and data from the Madrid City Council (geoportal of the Madrid City Council) will be used. To verify the quality and correct errors, the OSMOSE tool was used (December 2024). However, in previous studies, a mean square error of 4.85 m was determined (Martín and Pascual 2011). This error, adjusted to the OSMOSE processing, helps us guarantee the suitability of the information that we will use for this exercise. We must also consider the direction and general location error that can be implicitly present in the OSM model. However, this should not be a problem in our analysis since the input elements will be the same for the six algorithms. Therefore, the algorithm that generates the best response to the normal problems in cartography will be evaluated.

2.2. Methods studied

In geomatics and geographic information systems (GIS), the most used algorithms for any type of analysis are Dijkstra and A*. These algorithms are popular due to their efficiency, accuracy, and ease of use in determining the SP (Restrepo and Sánchez 2004). These two algorithms calculate the distance between a source node and a destination node. The bidirectional versions of Dijkstra and A* increase processing speed, which is especially useful in large road networks and random computational processes. On the other hand, the Bellman-Ford algorithm can manage arcs with negative weights, although in GIS it is not common to find arcs with negative weights, since discounts or utilities are not usually modelled in this context. The Johnson algorithm is more suitable for larger and heavier graphs since it can efficiently manage large amounts of data without limits on distances or processes.

2.2.1. Dijkstra

Dijkstra's algorithm is a method for finding the SP between a source node and one or multiple destination nodes. It was conceived by computer scientist Edsger W. Dijkstra in 1956 and published in 1959 (Dijkstra 1959). It is the most widely used algorithm in current computer science and any development involving SP in both navigation and communication networks, as well as data transfer. Functionally, Dijkstra's algorithm defines a node as an initial point A and assigns the rest of the nodes a distance with an infinite value (∞). Then, it proceeds to analyze the distance between point A and its closest neighbors: A, B, C, and D. For this example, we will analyze a simple scenario presented in Figure 1.

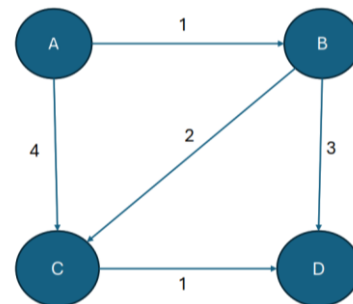


Figure 1: General Example by SP, A to D.

As shown in Figure 1, the process starts by generating a base value for each node: $A = 0$, $B = \infty$, $C = \infty$, $D = \infty$. The next step is to check the neighbourhood's $B = \text{distance} = 1$ ($A \rightarrow B$) and $C = \text{distance} = 4$ ($A \rightarrow C$), then as B is the shortest value between these two nodes. The algorithmic proceed to evaluate the neighbors of B and add the shortest route it would generate $A \rightarrow B \rightarrow C = 3$, $A \rightarrow B \rightarrow D = 4$ then as a result we have that, $A \rightarrow B = 1$, $A \rightarrow C = 3$, $A \rightarrow D = 4$ (Dijkstra 1959). In this way, ready have the shortest distances to each node present in the exercise. So, we have A, B, C, and D, which represent road intersections. Add direction to these intersections, creating arcs that represent the determined values of distance between intersections. Information systems can contain more than 1 million nodes and even more arcs. Therefore, it must be verified if there is a limit where the Dijkstra algorithm incurs a higher computational or memory cost when this process is carried out.

2.2.2. A* (A-star)

The A* algorithm was developed in 1968 to combine the heuristic approach and optimization of Dijkstra's algorithm. The algorithm works by maintaining two sets of vertices: one called Available and the other Analyzed. In these two sets, the nodes that are candidates for the best node option are placed. If they do not meet this requirement, they are sent to the Analyzed set, and the search continues, always looking for the SP. The heuristic model is a function that estimates in real time the cost of the shortest route (SP) from one node to the next. Generally, it is denoted as: $h(n)$, therefore each evaluation of the A* algorithm uses two fundamental values in each path between nodes as Eq. (1), the first $g(n)$ which is the exact cost of the path from the start to the next node n and $h(n)$ which is the estimate of the

cost from the current node n to the target node. Therefore, as found in Eq. (1) (Johner *et al.* 2022):

$$f(n) = h(n) + g(n) \quad (1)$$

Then, the A* algorithm selects the node with the lowest $f(n)$ value to expand it. In this way, the 'shortcut' is reached in terms of heuristics, and the function is simplified. Although the result may not be very exact, an approximate value is sufficient for this algorithm to work effectively (Kairanbay 2013).

2.2.3. Bellman-Ford

The Bellman-Ford algorithm searches the graph structure and generates the SP from a single source, even when the arc weights are negative. This makes the algorithm versatile, although in GIS it is not common to find negative values in a transmission or power line. The algorithm is intuitive and returns a Boolean value indicating whether there is a positive or negative cycle from any source. After performing iterations of relaxation of the arcs, the algorithm generates an additional pass or verification where two simple values are checked: true when no negative weight cycle is detected, or false if at least one of the cycles has negative weights. If a negative weight cycle is detected, the algorithm performs $n - 1$ iterations until the result is positive (Mukhlif and Saif 2020; Salazar and Villacrés 2022).

2.2.4. Johnson

Johnson's algorithm is an efficient technique to find shorter paths between two points in a graph by handling negative weights. It achieves this through three steps, combining the Bellman-Ford algorithm and the Dijkstra algorithm: (1) Using the Bellman-Ford algorithm, it labels the values as positive or negative and adds a fictitious node to the negative values to adjust the final value to zero. Then, it calculates the distances to the nearest node; (2) With the distance obtained between the two nodes with positive weights via the fictitious node, it determines the normal distance between them; (3) Finally, it applies the Dijkstra algorithm from each node of the graph to find the best pairs, using the distances determined in step 2 (Salazar and Villacrés 2022; Huaman *et al.* 2023).

2.2.5. Bidirectional Dijkstra and A*

The bidirectional algorithms of Dijkstra and A* are variations of the basic algorithms (numeral 2.2.1, numeral 2.2.2) that look for shorter paths from the same origin to a destination node for positive weights. The main difference is that the search is performed not only from the source node but also from the destination node. This bidirectional search generates a simultaneous task, which reduces the search time compared to a one-way version. Although this step increases processing time, it decreases the computational cost of searching, as tasks are split into two, forming an intermediate point between the two nodes (Stanford University 2017).

3. Algorithmic implementation

Import libraries and apply algorithms to spatial databases. The OSM data will be loaded using the OSMX library (Arsanjani *et al.* 2015), a powerful tool for

working with and analyzing networks as spatial databases or geospatial elements from OpenStreetMap. This data should have already passed through the OSMOSE corrector. However, for this exercise, the most important aspect is not precision but the versatility of the algorithm before imported in generating paths within thousands of nodes at once.

The environment used to set up the libraries was Anaconda. We created our environment and then imported the necessary libraries. The variable G will bring all the paths from OSM and process them to generate the nodes and their respective arcs. GeoPandas (Chunata *et al.* 2019) or pandas facilitate the visualization and analysis of geospatial data. Simple operations such as intersection and union can be performed, allowing us to analyze nodes as points and arcs as lines.

Algorithm 1: Training procedure for SP

Input: OSM from Madrid Spain, Shapefile Madrid Spain
Output: Create a dictionary of algorithms with their corresponding functions.

- Iterate over the algorithms and calculate the shortest path, processing time, memory consumption, and number of operations.
 - Handle exceptions and add results to the results list.
1. Import necessary libraries: OSMNX, Networkx, random, matplotlib, pyplot, shapely.geometry, pandas, Geopandas.
 2. Load the road network graph OR Read the shapefile.
 3. Create a direct graph.
 4. Add edges to the graph using coordinates as nodes AND create a geometry,
 - Add edges to the graph G with weights based on the distance between consecutive points.
 5. Generate random nodes.
 6. Obtain random nodes AND calculate the shortest paths using algorithms, Dijkstra, A*, Bellman-Ford, Johnson, bidirectional Dijkstra, and bidirectional A*.
 7. Generate computational cost.
 8. END

It is also possible to manually import spatial databases using the GeoPandas gpd module, which allows us to read and write geospatial data such as shapefiles or GeoJSON. Once imported, we must generate the nodes and then generate the arcs based on the distances between the nodes.

We incorporate a random selection of 2 points that meet the general characteristics of distances of 1 km and progressively extend it until obtaining distances of 25 km between the two nodes. This data is stored and generates a table for each algorithm.

To process the SP data, we use the NetworkX library, where we define the Dijkstra, A*, Bellman-Ford, and Johnson algorithms. These algorithms are processed simultaneously to determine which generates the highest computational cost, distance, and processing time. From this, we generate a table for later analysis of the values as represented in the script Algorithm 1: Training procedure for SP.

4. Analysis and results

The analysis is carried out for the six different algorithms. Each table generated the results of each process: distance, processing time, memory consumed in MB, number of operations, and the number of nodes. This helps us understand each task that is performed depending on the number of nodes required to complete the task.

In Figure 2, a correlation is generated between all 1000 random points to perform a descriptive statistical analysis for the values in the Dijkstra algorithm table. Similar tables and analyses are generated for all other algorithms.

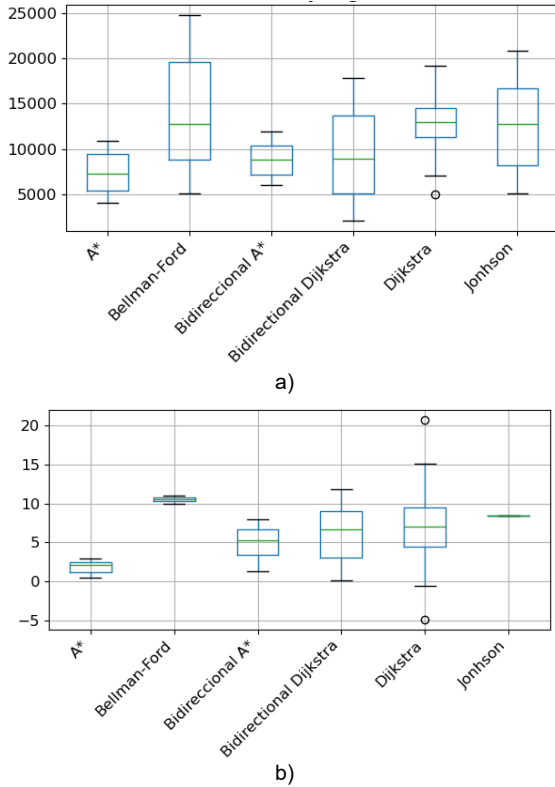


Figure 2: Descriptive statistical analysis for the values: a) Analysis of the best software solution based on the distance of the random nodes; b) Memory consumed in MB for each algorithm.

5. Conclusions

The analysis of the SP for OSM spatial databases shows that the most efficient algorithm for longer distances between 7 and 10 km with more than 500 nodes is the A* algorithm. This algorithm is also the best for short distances, based on the heuristic that calculates the SP faster, having a lower average processing time according to Table 1 with an APT = 0.36 sec and the lowest average consumption of AMC memory = 2.28 Mb.

The Bellman-Ford algorithm does generate considerable processing speed when it comes to SP analysis for more than 500 nodes. However, it generally requires too many resources to function optimally and uses more operations per second than its competitors demonstrating a high computational cost with processing time of 11.28 sec and consumption of 10.34 MB according to Table 1 and Figure 3b. It is a very practical solution if you have negative weights, although in spatial databases, negative values are not common.

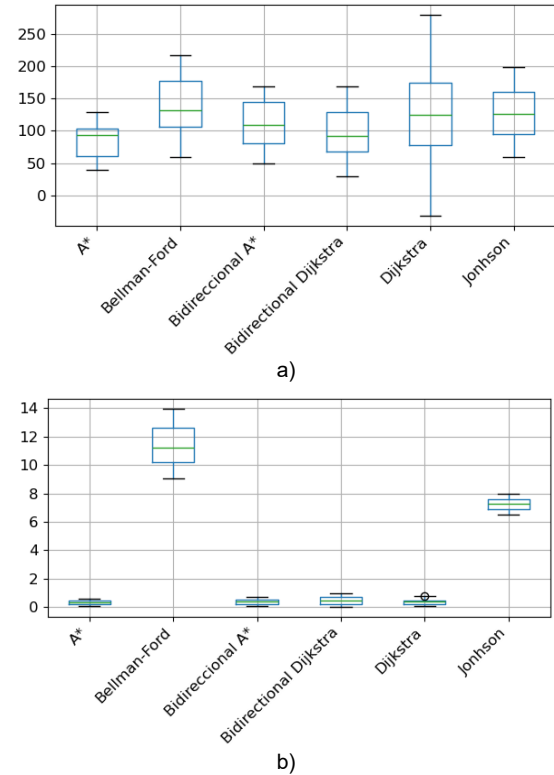


Figure 3: Descriptive statistical analysis for the values: a) Number of operations per algorithm; b) processing time in seconds.

Table 1: General results by algorithms and distance for 1000 random nodes and the best results for each process. Average Distance (AD); Standard Distance Assessment (SDA); Average Processing Time (APT); Average Memory Consumption (AMC); Average Number of Operations (AN); Average Number of Nodes (ANN).

Algorithm	AD	SDA	APT	AMC	AN	ANN
A*	7356.78	2117.14	0.36	2.28	92	102
Bellman-Ford (BF)	14141.43	6013.96	11.28	10.34	118	119
Bidirectional A* (BDA)	8856.25	1798.05	0.42	3.02	92	93
Bidirectional Dijkstra (BDD),	9427.62	4795.84	0.46	5.05	87	88
Dijkstra (DJ)	13033.38	2901.5	0.37	6.82	139	92
Johnson (JOH)	12668.95	4779.84	7.45	8.44	77	78

The algorithm that demonstrated the highest efficiency was the Dijkstra algorithm, as shown in Figure 4 for OSM data and spatial databases, with an average efficiency of 62.70% as shown in Figure 4 where it exceeds in overall performance with an ATP=0.37 sec and a computational cost of 6.82 MB, on the other hand the Bellman-Ford algorithm resulted with a remarkable efficiency of 49.44% although the implementation of it using Python programming language demands computational resources using more than 60% of extra resources than all the other algorithms tested with a processing time of 11.28 sec and memory consumption of 10.34 MB according to Table 1 and Figure 3a. It was also shown that the Bidirectional A* algorithm is the least efficient for applications using OSM data since it demands many processes for the analysis of nodes and shorter paths.

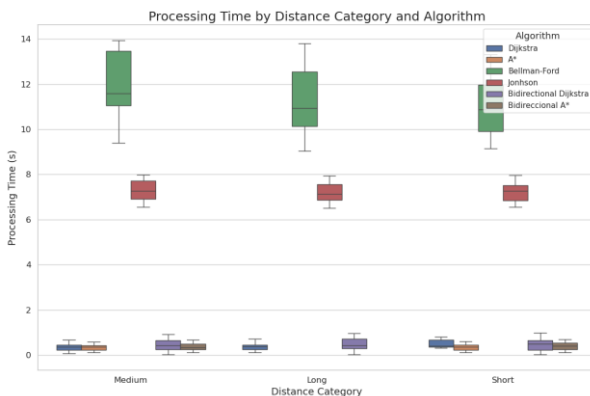


Figure 4: Efficiency for OSM data.

6. Considerations

The results suggest that the A* algorithm proved to be the most efficient in terms of speed for shortest and medium distances due to its heuristic component that

reduces search space. This suggests the characteristic of becoming a particularly useful tool for real-time applications such as urban navigation or emergency management systems; however, it is important to adjust topological coherence in high densities environments to ensure optimal performance.

The Dijkstra algorithm is the most stable, demonstrating consistence across diverse scenarios, although it does not incorporate heuristics methodology, its performance in large number of nodes is favorable and it does not need high computational resources, this can be one of the most complete algorithms to analyze spatial databases and develop alternatives in its performance, improving with neural networks or deep learning.

7. Future lines of research

The analysis of algorithms and their efficiency, especially for OpenStreetMap data or spatial databases, involves working on various tactics to increase their efficiency in the management and processing of arcs and nodes analysis. It is important to start with the application of analysis aimed at maximizing algorithms with current tools such as algebra topological or geostatistical analysis, where they can considerably increase the ability of the algorithm to handle data before, during and after the calculation of SP.

These must also be adjusted to artificial intelligence to improve performance and make the work more flexible with more optimal and accurate results. New techniques should be developed that merge mathematical techniques that meet the demands of spatial databases and thus ensure that processes are more efficient in more complex environments and over large areas.

References

- ARSANJANI, J.J., ZIPF, A., MOONEY, P., and HELBICH, M., 2015. An introduction to OpenStreetMap in Geographic Information Science: Experiences, research, and applications. In *OpenStreetMap in GIScience: Experiences, research, and applications* (pp. 1-15). Cham: Springer International Publishing.
- DIJKSTRA, E.W., 1959. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, **1**(1), pp. 269-271. ISSN 0945-3245. DOI: 10.1007/BF01386390.
- CHUNATA, D.M.G., SARMIENTO-TORRES, L.E., and INCA-CHUNATA, M.D.J., 2019. Métodos numéricos aplicados al conteo de operaciones para el cálculo del Costo computacional en Python. *Ciencia Digital*, **3**(3), pp. 331-344. ISSN 2602-8085.
- HUAMAN, R., ALVARES, M., QUISPE, J., QUISPE, E., and HUAMAN, J., 2023. *Algoritmos y Programaciones Avanzadas Curso II. Monografía*. Perú: Universidad Técnica de los Andes.
- HUANG, J., CUI, Y., CHANG, H., OBRACHT-PRONDZYŃSKA, H., KAMROWSKA-ZALUSKA, D., and LI, L., 2022. A city is not a tree: A multi-city study on street network and urban life. *Landscape and Urban Planning*, **226**, 104469.
- JOHNER, R., LANAIA, A., DORNBERGER, R., and HANNE, T., 2022. Comparing the Pathfinding Algorithms A*, Dijkstra's, Bellman-Ford, Floyd-Warshall, and Best First Search for the Paparazzi Problem. *Congress on Intelligent Systems. Singapore: Springer Nature Singapore*, pp. 561-576. ISBN 978-981-16-9113-3.
- KAIRANBAY, H., 2013. A Review and Evaluations of Shortest Path Algorithms. *International Journal of Scientific & Technology Research*, **2**(6), pp. 99-104.
- MARTÍN, A.V., and PASCUAL, A.F.R., 2011. Determinación de la calidad de OpenStreetMap (OSM) para la Comunidad de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid. *Presentado en Jornadas Ibéricas de Infraestructuras de Datos Espaciales JIIDE*.

- MUKHLIF, F., and SAIF, A., 2020. Comparative Study on Bellman-Ford and Dijkstra Algorithms. *International Conference on Communication, Electrical and Computer Networks*.
- RESTREPO, J.H., and SÁNCHEZ, J.J., 2004. Aplicación de la teoría de grafos y el algoritmo de Dijkstra para determinar las distancias y las rutas más cortas en una ciudad. *Scientia et technica*, **10**(26), pp. 121-126.
- SALAZAR-ÁLVAREZ, E.G., and VILLACRÉS-SAMPEDRO, J.E., 2022. Algoritmo de Bellman Ford para solucionar el problema de la ruta más corta entre nodos. *Polo del Conocimiento*, **7**. DOI: 10.23857/pc.v7i7.
- STANFORD UNIVERSITY, 2017. The Life Changing Magic of Dijkstra and A*. Programming Abstractions. Magistral Class. Stanford University. Available: https://web.stanford.edu/class/archive/cs/cs106x/cs106x.1174//lectures/25-Dijkstra_AStar/25-Dijkstra_AStar.pdf [1/15.2025].

DEEP LEARNING AND PHOTOGRAMMETRY: A REVIEW OF CURRENT ADVANCES AND FUTURE DIRECTIONS

APRENDIZAJE PROFUNDO Y FOTOGRAMETRÍA: UNA REVISIÓN DE LOS AVANCES ACTUALES Y FUTURAS DIRECCIONES

Javier Felipe Moncada-Sánchez^{a, b, *}, Juan F. Prieto^b, Serafín López-Cuervo^b

^a Ingeniería Catastral y Geodesia, Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Sede Calle 40, KR 8 40 - 62, 110231 Bogotá D.C., Colombia. , jfmoncada@udistrital.edu.co

^b Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartográfica, Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, Campus Sur, A-3, Km 7, 28031 Madrid, España.
javierfelipe.moncada.sanchez@alumnos.upm.es; , juanf.prieto@upm.es; , s.lopezc@upm.es

How to cite: J.F. Moncada-Sánchez, J.F. Prieto y S. López-Cuervo. 2025. Deep learning and photogrammetry: A review of current advances and future directions. En libro de actas: *Quinto Congreso en Ingeniería Geomática*. Valencia, 2 – 3 de Julio de 2025. <http://dx.doi.org/10.4995/CIGeo2025.2025.19881>

Abstract:

This article provides a comprehensive review of current deep learning techniques applied to photogrammetry. It examines recent progress and the transformation of photogrammetric workflows through the integration of (CNNs) and (GANs). Applications such as 3D reconstruction, image enhancement, semantic segmentation and change detection are explored. The review identifies key limitations and challenges while outlining future directions for this rapidly evolving field. As technologies mature, deep learning is expected to play a pivotal role in optimizing photogrammetric products for sectors including agriculture, environmental monitoring and infrastructure management.

Key words: Deep learning, Photogrammetry, 3D reconstruction, Semantic segmentation, Change detection

Resumen:

Este artículo proporciona una revisión exhaustiva del estado actual de las técnicas de aprendizaje profundo en el campo de la fotogrametría. Examina la transformación, el progreso reciente y los avances en fotogrametría, mejorando la precisión, automatización y capacidad de análisis de datos geoespaciales. Se revisan los avances más recientes en la integración de arquitecturas como las redes neuronales convolucionales (CNNs) y las redes generativas antagónicas (GANs) en diversas aplicaciones fotogramétricas, tales como la reconstrucción 3D, la superresolución y mejora de imágenes, la segmentación semántica, y la detección de cambios. La revisión abarca la investigación y los desarrollos hasta el año 2024, con un enfoque en las publicaciones en revistas y artículos científicos. El artículo tiene como objetivo identificar las limitaciones, los desafíos clave y las direcciones futuras en la aplicación del aprendizaje profundo a la fotogrametría, con el objetivo de guiar la investigación en este campo en rápida evolución. A medida que estas tecnologías continúan avanzando, se espera que el deep learning desempeñe un papel fundamental en la optimización y expansión de las aplicaciones de la fotogrametría en sectores como la agricultura, el monitoreo ambiental y la gestión de infraestructuras.

Palabras clave: Aprendizaje profundo, Fotogrametría, Reconstrucción 3D, Segmentación semántica, Detección de cambios

1. Introduction

Photogrammetry has been fundamental in the field of geomatics and disciplines such as geographic information systems, sensors and cartography, among others, for over a century. It has enabled us to make precise measurements and create representations of the real world through the use of photographic images. With the advancement and use of technology and new manned and unmanned aerial platforms, photogrammetry has evolved considerably, reaching the

point of supporting and revolutionizing fields such as agriculture, urban planning and the environment, among many others. However, traditional methods used in photogrammetry, such as geometric correlation and manual image analysis, can present limitations, especially when dealing with complex scenarios such as low resolution, variable lighting, the need for accurate object identification and occlusions.

The development of deep learning, a subdiscipline of machine learning, has driven a new technological revolution that has catapulted the analytical and

* Corresponding Author: Javier F. Moncada-Sánchez, jfmoncada@udistrital.edu.co, javierfelipe.moncada.sanchez@alumnos.upm.es

processing capabilities of photogrammetric images. Photogrammetry has leveraged the application of these modern architectures—such as Convolutional Neural Networks (CNNs) and Generative Adversarial Networks (GANs)—to improve the precision and automation of its results and products, allowing challenges that once seemed insurmountable to be addressed more easily today.

This article provides a comprehensive review of recent advances in the use of deep learning in photogrammetry, highlighting its applications in 3D (Ponti and da Costa 2018; Gaetano *et al.* 2018), image enhancement (Xu *et al.* 2017; de Jong *et al.* 2020), and change detection (Khelifi and Mignotte 2020; Cheng *et al.* 2024), as well as the challenges that still need to be overcome to maximize its potential across various industries.

2. Applications of Deep Learning in Photogrammetry

Deep learning has emerged as a transformative approach in the field of photogrammetry, revolutionizing traditional techniques and paving the way for unprecedented advances. These improvements have enabled photogrammetry and deep learning to jointly address highly complex challenges (Lunga *et al.* 2019; Persello *et al.* 2021), such as 3D reconstruction, image segmentation and temporal image analysis, significantly increasing the efficiency and accuracy of numerous key processes. As deep learning models are integrated into photogrammetric workflows, new opportunities arise to improve the quality and speed of results and to tackle problems previously difficult to solve with conventional techniques (Deng 2016; Lunga *et al.* 2021; Ponti and da Costa 2018).

This section reviews some of the main applications of deep learning in photogrammetry, categorizing different approaches and highlighting their benefits and impacts on this discipline. The thematic classification used here is based on several fundamental pillars of photogrammetry.

2.1. 3D Reconstruction

Three-dimensional reconstruction from images is one of the main strengths and challenges of photogrammetry. This process has been used in multiple tasks such as 3D modeling, mapping, infrastructure and cultural heritage analysis and urban planning. The integration of 3D reconstruction with deep learning techniques (Lunga *et al.* 2021; Ongie *et al.* 2020; Ponti and da Costa 2018) has enabled significant advancements by simplifying, automating and improving the accuracy of these processes. This allows the generation of more precise, detailed and realistically textured 3D models from 2D image sets (Albuquerque 2022; Gaetano *et al.* 2018; Lunga *et al.* 2021; Trujillo-Jiménez 2024).

Photogrammetry has traditionally relied on geometric methods and feature-matching algorithms such as Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) or Speeded-Up Robust Features (SURF). However, these techniques face limitations when dealing with complex scenes with low texture, occlusions or insufficient resolution. In such scenarios, deep learning models,

particularly CNNs, have shown superior results by learning robust representations of visual features and spatial relationships, allowing more accurate 3D geometry reconstruction from 2D data (Zhong *et al.* 2024).

CNNs have proven particularly effective in this domain, as they can learn relevant feature hierarchies from complex input data, enabling more precise and detailed reconstructions (Ongie *et al.* 2020). They are especially effective in automating and improving the reconstruction process through the extraction, identification and correlation of key features in image sets (Ponti and da Costa 2018), significantly improving reconstruction quality compared to traditional methods based on bundle adjustment and triangulation (Gaetano *et al.* 2018). Furthermore, it has been observed that integrating deep learning techniques with photogrammetry not only improves the accuracy of the 3D models generated but also significantly reduces the processing time required to obtain results (Gaetano *et al.* 2018; Valerga-Puerta *et al.* 2020). Several studies have demonstrated that deep CNN are capable of predicting depth maps and 3D geometry from a single 2D image (Ongie *et al.* 2020; Ponti and da Costa 2018; Zhong *et al.* 2024).

Other deep learning approaches, such as Generative Adversarial Networks (GANs), have also shown promising capabilities for realistic synthesis of 3D geometries and textures. GANs have been used, for example, to fill gaps and extrapolate 3D geometry from incomplete or partial data (Laina *et al.* 2016; Zhao *et al.* 2018) and have been particularly effective in correcting artifacts and generating fine-level details (Albuquerque 2022; Lattas *et al.* 2020).

The 3D reconstruction of irregular timber structures in the construction field has been successfully addressed through the use of close-range digital photogrammetry and deep learning techniques (Arias *et al.* 2007). The 3D reconstruction of archaeological objects and cultural heritage has also received special attention, where deep learning models have proven to be more effective than traditional approaches in scenarios with occlusions, low texture and limited input image resolution. 3D reconstruction from RGB-D images has benefited from deep learning advances, which have shown greater robustness and accuracy than traditional methods, especially in environments with challenging lighting and occlusions (Qin and Gruen 2021; Trujillo-Jiménez 2024).

Hybrid approaches that combine the strengths of traditional photogrammetry, the capabilities of deep learning models and multisensor data have improved the quality of generated 3D models by leveraging the complementary advantages of each approach (Albuquerque 2022; Zhong *et al.* 2021, 2024). One example of this approach is the use of CNNs together with LiDAR point cloud data to generate more accurate and complete 3D reconstructions of urban environments (Chen *et al.* 2020b).

The full automation of the 3D reconstruction process is another key benefit of deep learning, eliminating the need for the intensive manual intervention required by traditional photogrammetric methods. In this way, human supervision of processes such as image alignment and dense point cloud generation is significantly reduced. This brings important benefits in terms of reducing

human errors, processing times and associated costs. These advantages are particularly important in the development or application of these techniques for emergency response situations such as natural disasters, where response time becomes a key or even decisive factor (Trujillo-Jiménez 2024).

2.2. Semantic Segmentation and Classification

Beyond geometric reconstruction, the integration of deep learning techniques in photogrammetry has led to significant advancements in the field of semantic segmentation and classification of elements and objects in 3D point clouds. The identification and classification of features such as water bodies, vegetation and buildings are fundamental processes in photogrammetry. This combination has revolutionized such procedures, increasing the capacity of systems to segment complex image sets with high levels of detail and precision (Beckman *et al.* 2019; Gray *et al.* 2019).

Segmentation and classification in photogrammetric processes have traditionally relied on mathematical and geometric algorithms, in addition to manual supervision and editing, which obviously involves considerable human effort and is highly prone to error—especially in scenarios where the images are of low quality or exhibit high spatial variability. These automated deep learning-based processes for semantic segmentation and classification facilitate the extraction and structuring of high-quality geospatial information from photographic data, which is essential for the development of multiple applications such as thematic mapping, land use analysis and infrastructure management (Caicedo *et al.* 2022). Scientific literature shows that deep learning models far outperform traditional segmentation and classification methods, particularly in complex scenarios with high variability and heterogeneity of the objects to be classified.

The ability of CNNs to learn high-level representations from complex visual data enables them to accurately identify and classify specific elements in both 2D and 3D models. CNNs can be trained to identify and classify different types of objects in images with remarkable precision using labeled datasets. Recent studies have shown that CNNs can learn to segment and classify natural and artificial elements—such as urban zones, forested areas, crops, or water bodies—from aerial and satellite imagery with high detail, even under highly variable lighting and resolution condition (Eldefrawy *et al.* 2022; Grilli *et al.* 2021).

The classification of different crop types and the monitoring of their health and productivity from drone-captured imagery using CNNs has also been successfully addressed. This allows farmers and land managers to obtain detailed and relevant information about the state of their crops, facilitating decision-making, reducing costs and optimizing tasks such as fertilizer application and pest control (Gené-Mola *et al.* 2020).

Similarly, the use of advanced semantic segmentation techniques such as Mask R-CNN has enabled the accurate identification and extraction of specific elements in 3D point clouds, including vehicles, buildings and road signage, with applications in fields such as

urban planning, cadastral mapping and traffic management (Ahmed *et al.* 2021). Deep learning-based semantic segmentation in urban contexts facilitates the extraction, identification, classification and monitoring of roads, bridges, buildings and various infrastructures—proving highly valuable for improving urban mapping processes, city maintenance, emergency management and smart city systems (He *et al.* 2023; Lee *et al.* 2019; Minaee *et al.* 2022). These deep learning approaches have also proven effective for semantic classification of elements in cultural heritage scenes and archaeological sites. Deep learning models can learn hierarchical features at a high level, including shape, texture and relative position of objects, which gives them strong discriminatory and classification power—allowing them to differentiate materials and detect anomalies with great efficiency and accuracy (Morelli *et al.* 2022).

2.3. Super-Resolution and Image Enhancement

One of the most promising areas of deep learning in photogrammetry is the improvement of image quality and resolution used in photogrammetric processes. Many applications require high-resolution, high-quality images. However, this is not always possible due to limitations in capture systems, environmental conditions, or even financial constraints. This is where deep learning techniques have proven to be highly effective in enhancing resolution, sharpness and overall image quality, as well as in reducing noise and artifacts, through what is known as super-resolution.

Traditional methods for improving image resolution are usually based on interpolation or frequency techniques, such as bicubic interpolation or Fourier-based super-resolution approaches. However, these methods have significant limitations in their ability to recover fine details and deal with complex variations present in the images (Beckman *et al.* 2019). In contrast, deep learning approaches—particularly through the use of GANs and CNNs have facilitated the development of more advanced methods capable of learning directly from data, thereby overcoming the constraints of traditional techniques (de Jong *et al.* 2020).

These deep learning models are trained on pairs of low- and high-resolution images, allowing them to learn the features and transformations necessary to enhance the input image quality and generate higher-resolution versions with increased sharpness and reduced noise. In the context of photogrammetry, the application of these super-resolution methods offers important benefits, such as the ability to work with lower-resolution images without sacrificing final output quality, or improving the information extracted from degraded or low signal-to-noise ratio images (Xu *et al.* 2017; Yaqub *et al.* 2022).

Additionally, deep learning-based approaches for image enhancement have also proven effective in correcting distortions, increasing contrast and improving other important aspects of image quality, such as edge clarity and artifact reduction. These capabilities represent a major advantage in photogrammetric applications where image quality is fundamental (Tu *et al.* 2023; Upadhyay and Awate 2019).

One of the most interesting advances in this field is the use of GANs for improving image resolution and quality.

GANs work by pitting two neural networks against each other: a generator and a discriminator. The generator is trained to produce high-resolution images from low-resolution input, while the discriminator is trained to distinguish between the generated images and real high-resolution ones (de Jong *et al.* 2020). GANs have also demonstrated high efficiency in recovering fine details and enhancing the resolution of satellite and aerial images, enabling better identification and analysis of spatial features (Beckman *et al.* 2019).

On the other hand, CNNs have proven highly effective at learning complex noise patterns in images (Xu *et al.* 2017) and eliminating them efficiently. This makes them a valuable tool for quality enhancement and noise mitigation in images used in photogrammetric processes (Braun and Borrmann 2019; Chen *et al.* 2020c; Pandey *et al.* 2018). This capability, combined with their ability to solve super-resolution problems, has made CNNs essential when working with images captured under adverse conditions, such as low lighting or poor atmospheric conditions.

Another interesting development in this field is the combination of GANs and CNNs to achieve comprehensive image quality enhancement, leveraging the strengths of both approaches to achieve superior results compared to using either technique alone. This deep learning strategy has been effectively used to enhance the quality and resolution of images captured by drones—a critical capability for the accurate detection and classification of landscape features, such as agricultural crops and urban infrastructure, in remote sensing and monitoring applications (Ko *et al.* 2021).

2.4. Temporal Analysis and Change Detection

Another area where deep learning has demonstrated great potential in photogrammetry is in temporal analysis and change detection across different periods or moments in time. Traditionally, change detection between multitemporal images has relied on techniques such as image differencing, post-classification comparison, or change vector analysis. However, these approaches present limitations in terms of accuracy, the ability to detect complex changes and robustness against variations in image acquisition conditions (Cheng *et al.* 2024; Pun *et al.* 2023; Santos Silva *et al.* 2022). Some notable studies in this context include (Cheng *et al.* 2024; Khelifi and Mignotte 2020; Mou *et al.* 2019), which present significant advancements in the field of change detection through deep learning, identifying new promising directions for future development (Cheng *et al.* 2024; Khelifi and Mignotte 2020).

Deep learning methods have proven to be a highly promising alternative to address these limitations. Specifically, CNNs have emerged as powerful tools for the automatic extraction of relevant features from images, enabling more precise and robust change detection in the face of factors such as lighting variation, viewing angles, or atmospheric conditions (Khelifi and Mignotte 2020). The application of deep learning techniques like Recurrent Neural Networks (RNNs) and their variants such as long short-term memory (LSTM) networks to the analysis of temporal image sequences has proven effective for detecting and mapping complex

territorial changes over time, such as urban growth, deforestation, floods and more (Khelifi and Mignotte 2020).

LSTM networks in particular have demonstrated high effectiveness in detecting changes in urban areas, where object variability and the density introduced by urban infrastructure make traditional methods less effective (Khelifi and Mignotte 2020). This RNN variant can retain relevant information over longer periods, better capturing gradual changes or those dependent on past events (Flórez-Pareja *et al.* 2023). In various studies, these networks have successfully monitored urban expansion and growth more efficiently, contributing to higher quality responses for decision-making processes (Santos 2019).

In the context of disaster management, rapid and accurate change detection is critically important. Deep learning techniques such as CNNs and RNNs have proven effective for analyzing satellite and aerial imagery in near real-time, enabling swift and effective emergency response. In crisis situations—such as following an earthquake or hurricane—the processing of drone-captured images using deep learning techniques enables quick identification of affected areas, assessment of damage severity and prioritization of rescue and response actions (Eltner *et al.* 2021). This approach allows for image analysis that is much faster and more accurate than traditional methods, reducing the human errors typically associated with those techniques.

2.5. Applications in Agriculture and the Environment

Deep learning has had a major impact and has revolutionized photogrammetry in the fields of agriculture and environmental management. Deep learning techniques have proven to be highly effective for classifying and segmenting crops and vegetation types from aerial and satellite imagery. CNNs have achieved great precision in identifying different crop types, plant diseases, weeds and even the maturity state of crops (Ahmed *et al.* 2023). Some works in this area have successfully detected crop variations caused by water stress, nutrient deficiencies and disease presence—before these symptoms become visible to the naked eye (Beckman *et al.* 2019; Chen *et al.* 2020c; Gené-Mola *et al.* 2020).

In this context, CNNs have shown great ability to extract relevant image features such as texture, color and structure, allowing for accurate classification of various types of land cover and vegetation (Ahmed *et al.* 2021; Li *et al.* 2023; Muthukumarana and Aponso 2020; Yaqub *et al.* 2022).

These capabilities are highly valuable for more efficient agricultural resource management and cultivation practice planning (Ahmed *et al.* 2021; Nex *et al.* 2019). Neural networks have proven to be more accurate at segmenting active crop zones from uncultivated areas. This capacity can be especially helpful in fields such as precision agriculture, where optimizing resources like water, fertilizers and pesticides is key to improving yield and productivity (Gray *et al.* 2019).

Likewise, deep learning has been successfully used for mapping and monitoring ecosystems and natural resources—such as forests, wetland and coastal areas—using satellite and aerial imagery. These applications include detecting changes in vegetation cover, assessing biodiversity, monitoring protected areas, habitat mapping and evaluating ecosystem health. The combination of aerial and satellite imagery with data from remote sensors enables CNNs to generate detailed maps of vegetation coverage, biodiversity and environmental changes (e.g., illegal deforestation, urban expansion, or climate change effects on natural ecosystems). This is fundamental for the sustainable management of natural resources (Ahmed *et al.* 2021; Ahmed *et al.* 2023; Eltner *et al.* 2021; Li *et al.* 2023; Muthukumarana and Aponso 2020).

The application of deep learning methods has also proven valuable for detecting and identifying pests and diseases that affect forests and agricultural crops. CNNs can be trained to recognize distinctive visual patterns indicative of pest infestations or disease outbreaks in aerial images. This allows for timely identification and facilitates a rapid intervention by farmers. This kind of early monitoring capability is fundamental for effective natural resource management and environmental conservation efforts (Santos 2019).

2.6. Infrastructure Inspection and Monitoring

Traditionally, the analysis of structural characteristics and the condition of infrastructure—such as bridges, buildings, pipelines, etc.—has been conducted manually, which also requires significant effort and time from experts, especially in areas that are difficult to access or present high safety risks. Deep learning techniques applied to images captured by drones and other remote sensing systems have revolutionized this field, enabling more efficient inspection and monitoring by processing captured images in an automatic or semi-automatic manner. This allows for the identification of damage, defects, deterioration, pathologies, structural issues, cracks, corrosion and other infrastructure problems much more effectively than traditional methods (Carrasco *et al.* 2022).

The use of neural networks in this area has shown great potential for identifying and classifying different structural elements in images—such as beams, columns and supports—and thereby assessing their condition in real time. This capability can be crucial for early detection of issues, preventing them from developing into serious failures that could compromise the safety of infrastructure and the people who use it (Figueroa-Yaguana 2022).

In this field, CNNs have been trained to automatically detect structural elements in bridges (Herraiz *et al.* 2019; Moura *et al.* 2021; Wuttke *et al.* 2021) using aerial imagery and to perform detailed assessments of their conservation status by identifying problems such as cracks, corrosion and displacements (Trujillo-Jiménez 2024).

2.7. Integration of Technologies and Sensors

The integration of technologies such as remote sensors, robotics, unmanned aerial vehicles (UAVs) and geographic information systems (GIS) with data from various types of sensors—such as LiDAR, multispectral, thermal and hyperspectral cameras—alongside deep learning techniques, has enabled the development of more comprehensive and accurate solutions for applications across multiple fields.

The fusion of different data sources, including LiDAR point clouds, aerial and terrestrial photographs, thermography and multispectral images, allows for the generation of high-resolution 3D models, vegetation maps, change detection and detailed assessments of infrastructure conditions. These outputs are fundamental for planning, maintenance and management processes (Zhong *et al.* 2024).

The integration of multispectral and hyperspectral cameras on aerial and satellite platforms has significantly improved the ability to monitor vegetation health and detect changes in land use, due to their capacity to capture information across multiple bands of the electromagnetic spectrum. This facilitates more accurate discrimination between vegetation types and early identification of water stress or pest outbreaks. When combined with deep learning techniques, it is possible to develop models that not only classify vegetation but also predict its health status and productivity (Alvarenga-Souto 2019; Ferreira-Sales 2023). Similarly, thermal sensors have expanded photogrammetry applications in infrastructure management and environmental conservation by detecting temperature variations that indicate anomalies such as water leaks, heat losses, or forest fires. By combining thermal images with other data and processing them using deep learning, models can improve the precision of structural or environmental problem detection (Buyukdemircioglu *et al.* 2022). Additionally, the use of drones and satellites equipped with multiple sensors to capture data from different angles allows for the creation of real-time maps and 3D models, enhancing the precision of infrastructure monitoring, urban planning and resource management and facilitating faster response to disasters or land use changes (Gruen 2021).

3. Challenges and Limitations

While the progress of deep learning in photogrammetry has been remarkable, several challenges and limitations remain that deserve deeper exploration. Analyzing these limitations is ultimately essential to maximize the potential of this technology within the field of photogrammetry.

One key challenge is the need for robust and interpretable deep learning models that can provide insights into their decision-making processes, rather than functioning as “black boxes” (Zhu *et al.* 2017). This lack of transparency means it is difficult to understand how or why a model makes certain decisions. This is particularly important in applications where clarity and explainability are critical, such as monitoring critical infrastructure or urban planning (Remondino 2019). Without a clear understanding of a model's outputs,

engineers and decision-makers may be hesitant to rely on such technologies for critical operations. In addition, the reproducibility of results and comparison between different deep learning approaches remain important challenges due to the complexity of the models and their sensitivity to hyper parameters.

A major limitation of neural networks is their reliance on large training datasets, which can restrict their applicability in resource-constrained environments or scenarios with limited data. CNNs and GANs, in particular, require extensive and well-labeled datasets to learn complex and generalized patterns that can be transferred to new cases. The issue lies in collecting high-quality data, which often demands significant resource investment in terms of time and cost (Beckman *et al.* 2019; Ko *et al.* 2021). Another challenge is adapting deep learning approaches to contexts with limited resources and data availability, such as in developing countries or remote regions. Developing efficient, low-data deep learning techniques that can function in such conditions, is essential to broaden the global reach and applicability of these technologies (Beckman *et al.* 2019; Ko *et al.* 2021).

Significant data variation—in resolution, lighting, angle and quality—also presents a major difficulty in the photogrammetric context. Ensuring that deep learning models remain robust under these conditions is crucial to ensure their reliability in real-world applications. In environmental monitoring, for instance, where lighting and weather conditions can vary drastically, models must maintain stable performance. This requires constant adjustments and recalibration to maintain adequate system reliability (Buyukdemircioglu *et al.* 2022). The need for continuous data normalization and the lack of standardized data input formats also remains significant barriers to broader adoption of deep learning in this domain (Alvarenga-Souto, 2019).

The high computational cost and energy consumption required to train and run high-performance deep learning models also present a challenge for implementation in low-resource devices, such as edge sensors and embedded systems used in photogrammetric applications. While advances in hardware and algorithms have helped mitigate this issue, further research into model optimization and compression techniques is necessary to enable deployment in constrained environments. This challenge becomes especially significant when real-time processing is required, such as in mobile applications, IoT, or disaster response and critical infrastructure inspection scenarios where rapid response times are crucial (Chen *et al.* 2020a; Eltner *et al.* 2021).

Another key challenge for the widespread adoption of deep learning in photogrammetry is the development of frameworks that facilitate the integration and combination of deep learning with traditional image processing and spatial analysis techniques. These complementary approaches should be explored thoroughly to leverage the best of both worlds and produce more robust and versatile solutions.

Developing deep learning models that can operate effectively across diverse geographical and regional contexts represents another significant challenge. Given the variability in environmental, cultural and geographic

conditions worldwide, it is crucial for these models to generalize beyond their initial training datasets. A lack of robustness and generalizability may limit the practical usefulness of deep learning in photogrammetry, requiring retraining or fine-tuning that increases costs and implementation time (Pasanau-Aguado 2024; Santos 2019).

An additional important challenge is ensuring integration and interoperability between deep learning systems and existing photogrammetric platforms and architectures. This demands a holistic and systemic approach. Moreover, integrating various types of sensors and technologies into a unified deep learning framework adds another layer of complexity. The variability in data captured from sensors like LiDAR, multispectral, thermal cameras and also from platforms such as UAVs, introduces additional challenges in terms of data fusion and processing. For models to be more effective, they must be able to handle and process heterogeneous data in a coherent and precise way, which requires advanced data fusion algorithms and robust models that can adapt to differences in data quality and format (Ferreira-Sales 2023; Gruen 2021).

Finally, another area of concern is the development of deep learning techniques capable of effectively handling the diverse and complex nature of photogrammetric data, including multimodal and multitemporal datasets. Advances in this direction will be crucial to unlocking the full potential of deep learning in photogrammetry, allowing for a more comprehensive and holistic analysis of the built environment and natural landscapes.

4. Future Perspectives

The outlook for incorporating deep learning into photogrammetry appears highly promising. As novel and improved algorithms emerge, alongside advanced data processing techniques, the opportunities to integrate deep learning into this field are unlimited and multifaceted.

One of the main areas of future focus will be expanding the applicability of deep learning beyond scenarios with large datasets and unlimited computational resources. The ability to develop deep learning models that can operate effectively with smaller datasets and limited computational power is crucial to democratizing the use of these techniques across a broader range of photogrammetric applications, particularly in resource-constrained environments (Jithendra and Mittal 2021). As deep learning becomes increasingly user-friendly and accessible—facilitated by the availability of open-source tools and the expansion of data resources—we can anticipate broader adoption of these technologies among professionals and organizations in their day-to-day operations, from small mapping companies to large government and non-profit entities responsible for managing vast regions and natural resources (Figueroa-Yaguana 2022; Trujillo-Jiménez 2024).

Likewise, the development of more interpretable and explainable deep learning approaches is expected to become a growing area of interest in the coming years. This will help improve the trustworthiness and adoption of these models in critical applications where appropriate explanation of the decision-making process is required (Jithendra and Mittal 2021).

Another important direction will be the exploration of deep learning techniques capable of effectively handling multi-source and multitemporal photogrammetric data. This will enable more comprehensive and holistic analyses of evolving environments. Integrating data from various types of sensors has the potential to improve the accuracy and fidelity of 3D models, which in turn can unlock a wide range of novel applications in domains such as precision agriculture, natural resource management and urban planning. (Ferreira-Sales 2023; Gruen 2021).

The combined use of deep learning with traditional photogrammetric and image processing techniques is also expected to give rise to more robust and versatile hybrid solutions that leverage the strengths of both approaches. Integrating deep learning with traditional photogrammetric techniques—such as Structure-from-Motion and Bundle Adjustment—presents an exciting opportunity for hybrid methodologies that capitalize on the complementary capabilities of these two paradigms. By combining the powerful feature extraction and classification capabilities of deep learning with the geometric and spatial modeling strengths of traditional photogrammetry, researchers and professionals can develop innovative solutions that are more adaptable, accurate and reliable across a wide range of photogrammetric applications and environmental conditions. Hybrid approaches that seamlessly integrate the best of both worlds have the potential to push the boundaries of what is possible in photogrammetry, unlocking new opportunities in 3D reconstruction, mapping, monitoring and analysis of the physical world.

Finally, integrating deep learning with other advanced approaches—such as computer vision, artificial intelligence and robotics—opens exciting possibilities for the future of photogrammetry. Efforts to combine these various disciplines could lead to innovative and transformative solutions, ranging from 3D reconstruction and modeling of environments and landscapes to autonomous vehicle and drone navigation, as well as intelligent monitoring and maintenance of infrastructure and natural resources. These multidisciplinary integrations have the potential to revolutionize the way we perceive, analyze and understand our physical world, opening new frontiers in applications such as urban planning, environmental management and disaster response.

5. Conclusions

This research has shown that the integration of deep learning techniques in photogrammetry has revolutionized the field, resulting in substantial improvements in the accuracy, efficiency and analytical capabilities of geospatial data. Innovative neural network

architectures—such as Convolutional Neural Networks (CNNs), Generative Adversarial Networks (GANs) and Recurrent Neural Networks (RNNs)—have enabled significant advancements in image quality enhancement, change monitoring and semantic classification, allowing for a more comprehensive interpretation and understanding of data derived from aerial and satellite platforms.

The integration of deep learning techniques has significantly advanced the field of photogrammetry. By enhancing image quality through super-resolution and noise reduction methods, deep learning has enabled greater accuracy in 3D modeling and object detection. This has unlocked new possibilities for applications in areas such as precision agriculture, infrastructure management and environmental monitoring. Deep learning has significantly expanded the analytical capabilities of photogrammetry, enhancing our capacity to monitor and interpret geospatial phenomena with greater accuracy and detail.

While deep learning has brought substantial benefits to photogrammetry, several challenges must still be addressed. The need for large, high-quality training datasets and high computational costs pose notable barriers. Furthermore, the lack of interpretability in deep learning models and the need for more transparent architectures remain critical limitations that could hinder widespread adoption, particularly in applications where explainability is essential. Nevertheless, ongoing research efforts aim to develop more efficient and accessible deep learning models, while improving the integration of various data sources and sensor modalities to further expand photogrammetric applications.

The future of deep learning in photogrammetry holds tremendous promise. As more sophisticated algorithms and advanced computational resources become increasingly accessible, we can expect a significant increase in the use and adoption of these techniques across a wide range of photogrammetric applications. Deep learning has the transformative potential to revolutionize the way we acquire, analyze and utilize geospatial data across many domains of geomatics and photogrammetry.

The use of deep learning in photogrammetry has not only enhanced the technical capabilities of the discipline but has also opened new and innovative opportunities for more efficient solutions and applications. As we continue to explore and develop these technologies, it is essential to address current challenges and work toward more accessible and transparent solutions that enable broader and more effective adoption of these groundbreaking techniques across various disciplines.

References

- AHMED, N., ASIF, H.M.S., SALEEM, G., and YOUNUS, M.U., 2021. Image Quality Assessment for Foliar Disease Identification (Agropath). *J. Agric. Res.*, 2021(2), 177–186.
- AHMED, S.F., ALAM, M.S. BIN, KABIR, M., AFRIN, S., RAFA, S.J., MEHJABIN, A., and GANDOMI, A.H., 2023. Unveiling the frontiers of deep learning: innovations shaping diverse domains. *ArXiv Preprint ArXiv:2309.02712*.
- ALBUQUERQUE, R.W.DE., 2022. Aplicação de aeronaves remotamente pilotadas e fotogrametria para avaliação e monitoramento de áreas em processo de restauração florestal.

- ALVARENGA-SOUTO, L., 2019. Ocorrência de *Leucoptera coffeella* e detecção da presença de minas comparando amostragem convencional e amostragem por fotogrametria terrestre. UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA.
- ARIAS, P., CAAMAÑO, J.C., LORENZO, H., and ARMESTO, J., 2007. 3D Modeling and Section Properties of Ancient Irregular Timber Structures by Means of Digital Photogrammetry. *Comp.-Aided Civil and Infrastruct. Engineering*, 22, 597–611. DOI: 10.1111/j.1467-8667.2007.00512.x
- BECKMAN, G.H., POLYZOIS, D., and CHA, Y.J., 2019. Deep learning-based automatic volumetric damage quantification using depth camera. *Automation in Construction*, 99(December), 114–124. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.12.006
- BRAUN, A., and BORRMANN, A., 2019. Combining inverse photogrammetry and BIM for automated labeling of construction site images for machine learning. *Automation in Construction*, 106(October). DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102879
- BUYUKDEMIRCIOGLU, M., KOCAMAN, S., and KADA, M., 2022. Deep Learning for 3D Building Reconstruction: a Review. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 43(B2-2022), 359–366. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2022-359-2022
- CAICEDO, J., ACOSTA, P., POZO, R., GUILCAPI, H., and MEJIA-ESCOBAR, C., 2022. Estimación de áreas de cultivo mediante Deep Learning y programación convencional. *ArXiv Preprint ArXiv*. <http://arxiv.org/abs/2207.12310>
- CARRASCO, P., GLENDA, G., and MORENO-CARRILLO, D.A., 2022. Generación de ortoimágenes de diferente nadir con pares estereoscópicos satelitales WorldView, y cartografía con Deep Learning a escala 1:5000 en el norte del DMQ. DOI: 10.1007/s11356-018-3817-x
- CHEN, M., FENG, A., MCALINDEN, R., and SOIBELMAN, L., 2020a. Generating Synthetic Photogrammetric Data for Training Deep Learning based 3D Point Cloud Segmentation Models. 20221, 1–12.
- CHEN, M., FENG, A., MCCULLOUGH, K., PRASAD, P.B., MCALINDEN, R., and SOIBELMAN, L., 2020b. 3D Photogrammetry Point Cloud Segmentation Using a Model Ensembling Framework. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 34(6). DOI: 10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000929
- CHEN, Y., CHRISTODOULOU, A.G., ZHOU, Z., SHI, F., XIE, Y., and LI, D., 2020c. MRI Super-Resolution with GAN and 3D Multi-Level DenseNet: Smaller, Faster and Better. *Debiao Li*.
- CHENG, G., HUANG, Y., LI, X., LYU, S., XU, Z., ZHAO, H., ZHAO, Q., and XIANG, S., 2024. Change Detection Methods for Remote Sensing in the Last Decade: A Comprehensive Review. *Remote Sensing*, 16(13), 1–21. DOI: 10.3390/rs16132355
- DE JONG, G., BIJLSMA, E., MEULSTEE, J., WENNEN, M., VAN LINDERT, E., MAAL, T., AQUARIUS, R., and DELYE, H., 2020. Combining deep learning with 3D stereophotogrammetry for craniosynostosis diagnosis. *Scientific Reports*, 10(1), 1–6. DOI: 10.1038/s41598-020-72143-y
- DENG, L., 2016. Deep learning: From speech recognition to language and multimodal processing. In *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing* (Vol. 5, pp. 1–15). DOI: 10.1017/atsip.2015.22
- ELDEFRAWY, M., KING, S.A., and STAREK, M., 2022. Partial Scene Reconstruction for Close Range Photogrammetry Using Deep Learning Pipeline for Region Masking. *Remote Sensing*, 14(13). DOI: 10.3390/rs14133199
- ELTNER, A., BRESSAN, P.O., AKIYAMA, T., GONÇALVES, W.N., and MARCATO-JUNIOR, J., 2021. Using Deep Learning for Automatic Water Stage Measurements. *Water Resources Research*, 57(3), 1–17. DOI: 10.1029/2020WR027608
- FERREIRA-SALES, V., 2023. Aperfeiçoamento do Treinamento de Redes de Super-Resolução Deep Learning a partir de Imagens Hiperespectrais aprimoradas. Universidade do Vale do Rio dos Sinos.
- FIGUEROA-YAGUANA, K.A., 2022. Modelado de una red neuronal artificial para reconocimiento de suelos utilizando deep learning [Universidad Técnica de Machala]. Available: <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/15886> [6/30, 2025].
- FLÓREZ-PAREJA, L.D., ESCOBAR-ARENAS, J.P., and FERNANDEZ-MC CANN, D.S., 2023. Estimación de irregularidades en pavimentos mediante técnicas de procesamiento digital de imágenes. *Revista Politécnica*, 19(37), 20–28. DOI: 10.33571/rpolitec.v19n37a2
- GAETANO, R., IENCO, D., OSE, K., and CRESSON, R., 2018. MRFusion: A Deep Learning architecture to fuse PAN and MS imagery for land cover mapping. 1–10.
- GENÉ-MOLA, J., SANZ-CORTIELLA, R., ROSELL-POLO, J.R., MORROS, J.R., RUIZ-HIDALGO, J., VILAPLANA, V., and GREGORIO, E., 2020. Fruit detection and 3D location using instance segmentation neural networks and structure-from-motion photogrammetry. *Computers and Electronics in Agriculture*, 169. DOI: 10.1016/j.compag.2019.105165
- GRAY, P.C., BIERLICH, K.C., MANTELL, S.A., FRIEDLAENDER, A.S., GOLDBOGEN, J.A., and JOHNSTON, D.W., 2019. Drones and convolutional neural networks facilitate automated and accurate cetacean species identification and photogrammetry. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(9), 1490–1500. DOI: 10.1111/2041-210X.13246

- GRILLI, E., BATTISTI, R., and REMONDINO, F., 2021. An advanced photogrammetric solution to measure apples. *Remote Sensing*, 13(19). DOI: 10.3390/rs13193960
- GRUEN, A., 2021. Everything moves: The rapid changes in photogrammetry and remote sensing. *Geo-Spatial Information Science*, 24(1), 33–49. DOI: 10.1080/10095020.2020.1868275
- HE, Z., KHANAL, S.R., ZHANG, X., KARKEE, M., and ZHANG, Q., 2023. Real-time Strawberry Detection Based on Improved YOLOv5s Architecture for Robotic Harvesting in open-field environment.
- HERRAIZ, Á.H., MARUGÁN, A.P., and MÁRQUEZ, F.P.G., 2019. Optimal Productivity in Solar Power Plants Based on Machine Learning and Engineering Management. In *Lecture Notes on Multidisciplinary Industrial Engineering: Vol. Part F46* (Issue November 2018, pp. 983–994). DOI: 10.1007/978-3-319-93351-1_77
- JITHENDRA, U., and MITTAL, U., 2021. Deep learning perspectives a review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1022(1), 0–13. DOI: 10.1088/1757-899X/1022/1/012005
- KHELIFI, L., and MIGNOTTE, M., 2020. Deep Learning for Change Detection in Remote Sensing Images: Comprehensive Review and Meta-Analysis. *IEEE Access*, 8, 126385–126400. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3008036
- KO, P., PRIETO, S.A., and DE SOTO, B.G., 2021. ABECIS: an Automated Building Exterior Crack Inspection System using UAVs, Open-Source Deep Learning and Photogrammetry. *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, 2021-Novem(October), 637–644. DOI: 10.22260/isarc2021/0086
- LAINA, I., RUPPRECHT, C., BELAGIANNIS, V., TOMBARI, F., and NAVAB, N., 2016. Deeper depth prediction with fully convolutional residual networks. *Proceedings - 2016 4th International Conference on 3D Vision, 3DV 2016*, 239–248. DOI: 10.1109/3DV.2016.32
- LATTAS, A., MOSCHOLOU, S., GECER, B., PLOUMPIS, S., GHOSH, A., PLOUMPIS, S., and ZAFEIRIOU, S., 2020. AvatarMe: Realistically Renderable 3D Facial Reconstruction “in-the-wild.” In *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 760–769).
- LEE, J., OH, J.E., KIM, M.J., HUR, B.Y., and SOHN, D.K., 2019. Reducing the Model Variance of a Rectal Cancer Segmentation Network. *IEEE Access*, 7, 182725–182733. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2960371
- LI, J., ZHANG, W., ZHOU, H., YU, C., and LI, Q., 2023. Weed detection in soybean fields using improved YOLOv7 and evaluating herbicide reduction efficacy. *Frontiers in Plant Science*, 14(January), 1–17. DOI: 10.3389/fpls.2023.1284338
- LUNGA, D., DIBIASE, D., DEMERS, M., JOHNSON, A., KEMP, K., LUCK, A. T., PLEWE, B., and WENTZ, E., 2019. CP-04-Artificial Intelligence Tools and Platforms for GIS.
- LUNGA, D., HU, Y., NEWSAM, S., GAO, S., MARTINS, B., YANG, L., and DENG, X., 2021. GeoAI at ACM SIGSPATIAL: The New Frontier of Geospatial Artificial Intelligence Research. *SIGSPATIAL Special*, 13(1–3), 21–32.
- MINAEE, S., BOYKOV, Y., PORIKLI, F., PLAZA, A., KEHTARNAVAZ, N., and TERZOPOULOS, D., 2022. Image Segmentation Using Deep Learning: A Survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 44(7), 3523–3542. DOI: 10.1109/TPAMI.2021.3059968
- MORELLI, L., BELLAVIA, F., MENNA, F., and REMONDINO, F., 2022. Photogrammetry Now and Then-From Hand-Crafted to Deep-Learning Tie Points. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 48(2/W1-2022), 163–170. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W1-2022-163-2022
- MOU, L., BRUZZONE, L., and ZHU, X.X., 2019. Learning spectral-spatial features via a recurrent convolutional neural network for change detection in multispectral imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(2), 924–935. DOI: 10.1109/TGRS.2018.2863224
- MOURA, M.M., DE OLIVEIRA, L.E.S., SANQUETTA, C.R., BASTOS, A., MOHAN, M., and CORTE, A.P.D., 2021. Towards amazon forest restoration: Automatic detection of species from uav imagery. *Remote Sensing*, 13(13), 1–15. DOI: 10.3390/rs13132627
- MUTHUKUMARANA, P.S., and APONSO, A.C., 2020. A Review on Deep Learning Based Image Classification of Plant Diseases. *International Journal of Computer Theory and Engineering*, 12(5), 118–122. DOI: 10.7763/IJCTE.2020.V12.1275
- NEX, F., DUARTE, D., TONOLO, F.G., and KERLE, N., 2019. Structural building damage detection with deep learning: Assessment of a state-of-the-art CNN in operational conditions. *Remote Sensing*, 11(23). DOI: 10.3390/rs11232765
- ONGIE, G., JALAL, A., METZLER, C.A., BARANIUK, R.G., DIMAKIS, A.G., WILLETT, R., and SOLTANOLKOTABI, M., 2020. Deep learning techniques for inverse problems in imaging. *IEEE Journal on Selected Areas in Information Theory*, 1(1), 39–56. DOI: 10.1109/JSAIT.2020.2991563
- PANDEY, R.K., VIGNESH, K., and RAMAKRISHNAN, A.G., 2018. Binary document image super resolution for improved readability and OCR performance. *arXiv preprint arXiv:1812.02475*.
- PASANAU-AGUADO, E., 2024. Reconocimiento de objetos 3D con Deep Learning.

- PERSELLO, C., WEGNER, J.D., HANSCH, R., TUIA, D., GHAMISI, P., KOEVA, M., and CAMPS-VALLS, G., 2021. Deep Learning and Earth Observation to Support the Sustainable Development Goals. X(X), 1–23. DOI: doi.org/10.48550/arXiv.2112.11367
- PONTI, M.A., and DA COSTA, G.B.P., 2018. Como funciona o deep learning. *arXiv preprint arXiv:1806.07908*.
- PUN, A.K., JAVED, M., and DOERMANN, D.S., 2023. A Survey on Change Detection Techniques in Document Images. *arXiv preprint arXiv:2307.07691*.
- QIN, R., and GRUEN, A., 2021. The role of machine intelligence in photogrammetric 3D modeling – an overview and perspectives. DOI: 10.1080/17538947.2020.1805037
- REMONDINO, F., 2019. Classification of aerial point clouds with deep learning. XLII(June), 10–14.
- SANTOS, I.A.D., 2019. Detecção de invasões biológicas no cerrado utilizando deep learning [Universidade Federal de Sao Carlos]. Available: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/12178> [6/30, 2025].
- SANTOS SILVA, D.H., BARBOSA, L.C., CAMPOS DO CANTO, L.F., MAXSUEL-BOMFIM, L.L., and BORBA-SCHULER, C.A., 2022. Fotogrametria Subaquática Aplicada à Reconstrução 3d de Objeto Submerso. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, 14(3), 128–139.
- TRUJILLO-JIMÉNEZ, M.A., 2024. Reconstrucción antropométrica 3D de bajo costo basada en procesamiento de imágenes y Deep Learning. UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR.
- TU, Z., MILANFAR, P., and TALEBI, H., 2023. MULLER: Multilayer Laplacian Resizer for Vision. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 2, 6854–6864. DOI: 10.1109/ICCV51070.2023.00633
- UPADHYAY, U., and AWATE, S.P., 2019. Robust super-resolution gan, with manifold-based and perception loss. *Proceedings - International Symposium on Biomedical Imaging*, 2019-April, 1372–1376. DOI: 10.1109/ISBI.2019.8759375
- VALERGA-PUERTA, A.P., JIMENEZ-RODRIGUEZ, R.A., FERNANDEZ-VIDAL, S., and FERNANDEZ-VIDAL, S.R., 2020. Photogrammetry as an engineering design tool. C. Alexandru, C. Jaliu, C and Comșit, M (ed) *Product Design. InTechOpen*, 41-64.
- WUTTKE, F., LYU, H., SATTARI, A.S., and RIZVI, Z.H., 2021. Wave based damage detection in solid structures using artificial neural networks. *arXiv preprint arXiv:2103.16339*.
- XU, J., GONG, E., PAULY, J., and ZAHARCHUK, G., 2017. 200x low-dose PET reconstruction using deep learning. *arXiv preprint arXiv:1712.04119*.
- YAQUB, M., JINCHAO, F., ARSHID, K., AHMED, S., ZHANG, W., NAWAZ, M.Z., and MAHMOOD, T., 2022. Computational and Mathematical Methods in Medicine - 2022 - Yaqub - Deep Learning-Based Image Reconstruction for Different.pdf. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2022, 18. DOI: 10.1155/2022/8750648
- ZHAO, R., WANG, Y., and MARTINEZ, A.M., 2018. A Simple, Fast and Highly-Accurate Algorithm to Recover 3D Shape from 2D Landmarks on a Single Image. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 40(12), 3059–3066. DOI: 10.1109/TPAMI.2017.2772922
- ZHONG, J., LI, M., GRUEN, A., GONG, J., LI, D., LI, M., and QIN, J., 2024. Application of Photogrammetric Computer Vision and Deep Learning in High-Resolution Underwater Mapping: A Case Study of Shallow-Water Coral Reefs. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, X-2–2024(June), 247–254. DOI: 10.5194/isprs-annals-x-2-2024-247-2024
- ZHONG, J., LI, M., QIN, J., and ZHANG, H., 2021. Deep Learning-Based UAV Aerial Triangulation without Image Control Points. 22–24.
- ZHU, X.X., TUIA, D., MOU, L., XIA, G.S., ZHANG, L., XU, F., and FRAUNDORFER, F., 2017. Deep Learning in Remote Sensing: A Comprehensive Review and List of Resource. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 5(December), 8–36. DOI: 10.1109/MGRS.2017.2762307

SENSITIVITY STUDY FOR THE CONTINUOUS GRAVIMETRIC NETWORK OF THE KĪLAUEA VOLCANO IN HAWAII: FIRST RESULTS

ESTUDIO DE SENSIBILIDAD DE LA RED GRAVIMÉTRICA CONTINUA DEL VOLCÁN KĪLAUEA, HAWAII: PRIMEROS RESULTADOS

Alejandra Bermeo-Cevallos^{a, b, *}, Ashton F. Flinders^c, José Fernández^a

^a Instituto de Geociencias, CSIC-UCM, C/ Doctor Severo Ochoa 7, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid, Spain. , a.bermeo@igeo.ucm-csic.es; , jft@mat.ucm.es

^b Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, C/ Mercator 2, 28031 Madrid, Spain.

^c USGS Hawaiian Volcano Observatory, 1266 Kamehameha Avenue, Suite A-8 Hilo, HI 96720, United States. , aflinders@usgs.gov

How to cite: A. Bermeo-Cevallos, A.F. Flinders y J. Fernández. 2025. Sensitivity study for the continuous gravimetric network of the Kīlauea volcano in Hawaii: First results. En libro de actas: *Quinto Congreso en Ingeniería Geomática*. Valencia, 2 – 3 de Julio de 2025. <http://dx.doi.org/10.4995/CIGeo2025.2025.19654>

Abstract:

We present a sensitivity analysis for the continuous gravimetric monitoring network at Kīlauea volcano, Hawai'i, USA. Our methodology is an extension of the method proposed by Fernández *et al.* (1999) and enables the estimation of the intrusion radius-depth range where the effects (surface gravity changes in our case) would be clearly detected. The magmatic intrusion is considered as a spherical point source, and we use the elastic-gravitational deformation model proposed by Rundle (1982) and extended by Rundle and co-workers (Fernández and Rundle 1994a; 1994b; Fernández *et al.* 1997; 2006). Additionally, a correction for topographic effects is included. We obtain first results indicating that, in the case of Kīlauea, a network configuration using five gravimeters at radial distances between 0.5 and 3 km from the surface projection of the Halema'uma'u source centre could be an effective strategy for volcano monitoring, facilitating the early detection of gravity effects produced by magmatic intrusions with a radius a , occurring at depths between 3 and 30 km.

Key words: Geodetic volcano monitoring, Gravity changes, Permanent gravimetric network, Kīlauea volcano

Resumen:

Se presenta un análisis de sensibilidad aplicado a la red gravimétrica continua del volcán Kīlauea, Hawái, EE.UU. Esta metodología es una extensión del método propuesto por Fernández *et al.* (1999) y permite estimar el rango radio-profundidad de una intrusión magmática cuyos efectos (en este caso, variaciones de gravedad en superficie) podrían ser detectados mediante las observaciones de la red gravimétrica. La intrusión se modela como una fuente esférica puntual, y se emplea el modelo de deformación elástico-gravitacional propuesto por Rundle (1982) que posteriormente fue extendido por Rundle y colaboradores (Fernández and Rundle 1994a; 1994b; Fernández *et al.* 1997; 2006). Además, se incluye una corrección por efectos topográficos. Los primeros resultados obtenidos indican que, en el caso del volcán Kīlauea, una configuración de red compuesta por cinco gravímetros ubicados a distancias radiales entre 0.5 y 3 km de la proyección en superficie del centro de la fuente Halema'uma'u podría ser una estrategia eficaz para la vigilancia de volcanes, facilitando la detección temprana de efectos gravitatorios producidos por intrusiones magmáticas de radio a , ocurridas a profundidades entre 3 y 30 km.

Palabras clave: Vigilancia geodésica de volcanes, Cambios de gravedad, Red gravimétrica permanente, Volcán Kīlauea

1. Introduction

Volcanic eruptions are among the most dangerous natural phenomena, posing a great threat to populations and infrastructure (Loughlin *et al.* 2015). The study of volcanic unrest and eruption forecasting remains one of the greatest challenges for the scientific hazard community (Fernández *et al.* 2017; Poland *et al.* 2020).

Quantifying the criteria that define an adequate instrumental monitoring system and associated methodologies is essential for assessing these objectives, particularly with regards to early detection of magma ascent. Geodetic techniques play an important role in this respect (Fernández *et al.* 1999; Fernández and Luzón 2002). Advances in instrumentation, processing techniques and data collection have

* Corresponding Author: Alejandra Bermeo-Cevallos, a.bermeo@igeo.ucm-csic.es

facilitated the widespread geodetic study of volcanic activity.

Due to their cost and operational difficulties, gravity measurements are not as frequently used as deformation techniques (GNSS, tilt, etc.) in operational geodetic volcano monitoring systems (de Zeeuw-van Dalfsen and Poland 2023). However, gravimetry can play a crucial role in monitoring and assessing volcanic unrest, as it enables the detection of underground mass redistributions that are difficult to observe through deformation or other techniques (Battaglia *et al.* 2008; Pritchard *et al.* 2019; Tizzani *et al.* 2024). In addition, gravity data can provide insights into the location and density of accumulating magma or magmatic foam/gas (Carbone *et al.* 2015), which are often responsible for unrest and help to characterize the causative source.

Different data collection methods, such as campaign versus continuous monitoring, or relative versus absolute gravity measurements offer the potential to capture a wide spatial (meters to kilometres) and temporal (seconds to years) range of signals at a wide range of volcanic systems (de Zeeuw-van Dalfsen and Poland 2023).

Permanent networks of multiple continuously recording gravity instruments are rare at volcanoes. Two of the locations where such measurements are made are Mount Etna in Sicily, Italy, and Kīlauea in Hawai'i, USA (de Zeeuw-van Dalfsen and Poland 2023). Kīlauea is one of the most active volcanoes in the world and has a comprehensive monitoring system managed by the USGS Hawaii Volcano Observatory (HVO) (Montgomery-Brown *et al.* 2024).

HVO currently operates a hybrid gravimetric network composed of relative gravimeters and an absolute gravimeter (de Zeeuw-van Dalfsen and Poland 2023; Flinders 2023). This type of network is useful for distinguishing different source mechanisms and improving the tracking of spatiotemporal gravity changes (Okubo *et al.* 2013).

Relative and absolute gravity measurements differ in terms of the instruments used, cost, and accuracy of results. Spring-based gravimeters are the easiest to deploy due to their lower cost, small size, and low energy requirements (Battaglia *et al.* 2008). However, their measurements can become less reliable over extended periods due to their drift rates and sensitivity to environmental changes such as temperature and atmospheric pressure changes (Antoni-Micollier *et al.* 2022; Carbone *et al.* 2015; Poland *et al.* 2021). In contrast, superconducting and absolute gravimeters provide more stable continuous measurements with minimal instrumental drift. While they are highly sensitive and precise, this sensitivity also allows for the detection of subtle environmental signals that might go unnoticed with other instruments. However, they require more power, infrastructure, and are significantly more expensive than spring-based gravimeters (Cooke *et al.* 2021). Absolute gravimeters offer the additional advantage of measuring absolute gravitational acceleration, allowing them to be relocated or repaired without resetting the time series (de Zeeuw-van Dalfsen and Poland 2023).

In this study, we apply a sensitivity analysis to the continuous gravimetric network at Kīlauea to assess its

ability to detect surface gravity variations produced by magmatic intrusions in Kīlauea's plumbing system from the upper mantle (30 km) to shallow storage areas (Halema'uma'u, see Fig. 1). Additionally, we aim to define an optimal network configuration. We consider a specific model to represent the magmatic intrusion (Rundle 1982; Fernández and Rundle 1994a; 1994b) and employ an improved methodology proposed by Fernández *et al.* (1999). This methodology allows for the estimation of the intrusion radius-depth range, where the geodetic effects (e.g., gravity changes) can be clearly detected through the geodetic instruments. Fernández *et al.* (1999) considered only single gravimeters, which we now extend to consider permanent network observations.

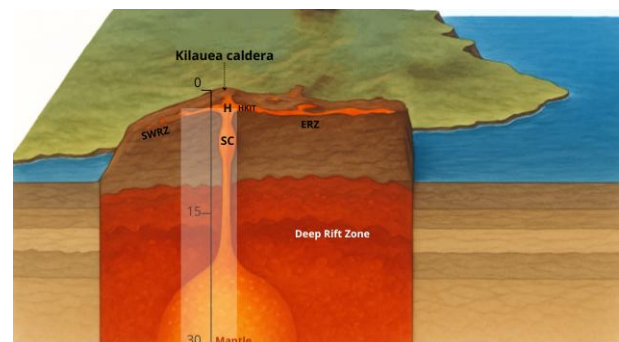


Figure 1: Structural model for the magmatic plumbing system of Kīlauea volcano in Hawaii. The proposed system is composed by a central reservoir, and two rift zones. The translucent white rectangle shows the depth range considered in this study. See text for more details. Modified from Poland *et al.* (2014).

2. Kīlauea: geological characteristics and monitoring network

Kīlauea is part of the Hawaiian hotspot, located on the eastern slope of neighboring Mauna Loa. It is a shield volcano and is in the shield-building stage of Hawaiian volcanism (USGS 2024).

Over the past 2,500 years Kīlauea's activity has been characterized by alternating periods of explosive and effusive eruptions (Lynn and Swanson 2022); the volcano primarily produces basaltic lavas. In the shallow crust (less than 5 km depth), the volcano's magmatic plumbing system exhibits a complex distribution including two rift zones extending to the southwest and east. Poland *et al.* (2014) proposed a model for Kīlauea's magma plumbing system (Fig. 1) which includes two long-term reservoirs located between 1 and 5 km deep. The deeper of the two is referred to as the South Caldera reservoir and the shallower as the Halema'uma'u reservoir. The magmatic system at Kīlauea includes shallow rift zones that radiate from the summit region. The East Rift Zone (ERZ) and the seismic Southwest Rift Zone (SWRZ), both located at approximately 3 km depth, are connected to the South Caldera magma reservoir and accommodate magma transport during episodes of summit pressurization. Additionally, the Halema'uma'u–Kīlauea Iki Trend (HKIT) represents a shallow volcanic pathway, extending southwest from Halema'uma'u crater and fed by high-level parts of the summit magma system. While these rift zones differ in depth and structural character, they play a

key role in guiding magma migration away from the summit.

Eaton and Murata (1960) proposed a model for Kilauea's magmatic system in which magma is generated in the mantle, ascends, and is stored in shallow reservoirs. From these reservoirs, magma can either erupt within the caldera or be transported laterally into the east or southwest rift zones. They estimated a density of 2770 kg/m³ for the intrusion (ascending magma) and 3270 kg/m³ for the mantle at depths greater than 12 km.

Continuous gravity measurements at Kilauea started in 2010 when two spring gravimeters were installed by the Hawaiian Volcano Observatory (HVO). A third was added in 2014. This network functioned intermittently until the 2018 summit caldera collapse (Poland *et al.* 2021). The network was reconfigured between 2019 and 2022, and consisted of four spring gravimeters and one Absolute Quantum Gravimeter (AQG), operating continuously around the summit region. However, ongoing eruptions since 2021 have necessitated the removal of two stations (CALM, CALS).

Figure 2 shows the spatial distribution of the pre-2023 gravimetric network. This network consists of one absolute gravimeter (indicated by a green marker) and four relative gravimeters. Among the relative instruments, two stations locations (shown in red) were lost during the 2023 eruptions, while the remaining two are represented by blue markers. Additionally, yellow markers denote proposed sites for new gravimeter installations (Flinders, personal communication 2024). These locations have been strategically selected to enhance monitoring coverage of both the caldera and the southwest rift zone.

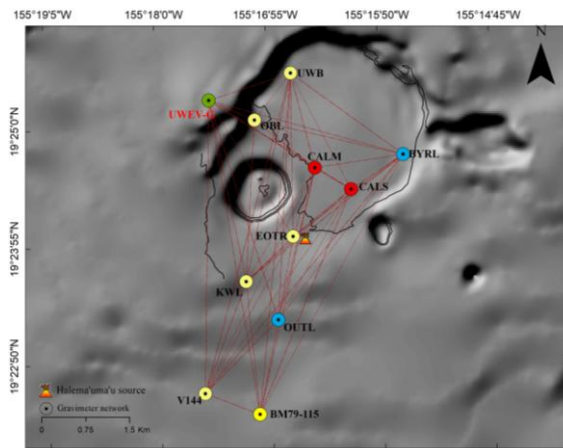


Figure 2: Location of the gravimetric stations: The green circle represents an absolute gravimeter; the red and blue circles represent former and current relative gravimeters, respectively; and the yellow circles indicate proposed locations for new gravimeters.

3. Methods

In this study, we analyse the capability of the continuous gravimetric network of Kilauea to detect magmatic intrusions of varying sizes and depths. The gravity changes produced by magmatic intrusions—from the mantle to the shallow surface—are estimated to perform a sensitivity analysis. We use a theoretical approach based on an elastic-gravitational deformation model

(Rundle 1982; 1983; Fernandez and Rundle 1994a; 1994b; Fernández *et al.* 1997; 2006). We follow, and extend, the methodology applied by Fernández *et al.* (1999) for Tenerife and Lanzarote in the Canary Islands.

To analyse the deformation and gravity changes caused by magmatic intrusions, a theoretical model based on a stratified elastic-gravitational half-space is used. This choice reflects the layered nature of volcanic areas and allows for a more accurate representation of the Earth's vertical structure and its influence on the effects produced by a magmatic intrusion (Roth 1993; Fernandez and Rundle 1994a; 1994b). Variations in physical properties with depth can significantly alter both the magnitude and spatial pattern of surface deformation and gravity anomalies, compared to those predicted by homogeneous models.

Although many classical models simplify the Earth as a homogeneous elastic half-space, this assumption can lead to inaccuracies. Several studies (Roth 1993; Fernández and Rundle 1994a), have demonstrated that changes in subsurface rigidity and density with depth notably affect the geophysical response to magmatic intrusions.

The coupling between elasticity and gravity is generally negligible for displacements at volcano monitoring scales. However, it becomes non-negligible when modelling magma emplacement, as the mass source alters gravity change patterns and may produce measurable anomalies (Rundle 1980; 1982; Fernández *et al.* 2006). For this reason, it is important to incorporate the ambient gravity field into the model, as it plays a crucial role in predicting surface gravity changes, even if its impact on displacements and tilt is minor (Battaglia *et al.* 2008).

Another important aspect considered is topography. Numerous studies (McTigue and Stein 1984; Cayol and Cornet 1998; Williams and Wadge, 1998; 2000; Charco *et al.* 2002), show that neglecting topography can bias results (Folch *et al.* 2000) in both of their magnitude and spatial pattern. Therefore, in regions with significant topographic relief, the results must be interpreted with caution or corrected accordingly.

We used the methodology proposed by Williams and Wadge (1998) for the application of the topographic correction, which allows us to obtain approximate solutions in an analytical way for vertical displacement and gravity changes (Charco *et al.* 2002). It considers that the source has a variable depth, depending on the variable height of the terrain relief at each point, *i.e.*, the depth of the source is replaced by a position-dependent function (Charco *et al.* 2004).

Viscoelastic effects and Earth's curvature can be neglected, given the short temporal scale of the processes considered (pre-eruptive intrusion phases), which allows for a simplified yet robust modelling approach, and the short distances we consider, less than 100 km.

The Earth model is represented as a set of $(p - 1)$ homogeneous flat layers (Rundle 1980, Fig. 1); each layer has its own Lamé parameters λ_i, μ_i density ρ_i , and thickness d_i , overlying a homogeneous half-space. The bottom half-space is considered layer p with properties λ_p, μ_p , and ρ_p .

The displacements, gravity, and gravity changes are considered as produced by a spherical intrusion, which we treated as a point source located at $(0,0,c)$. We use a system of cylindrical coordinates (r,θ,z) with unit vectors (e_r, e_θ, e_z) and the origin located at the epicentre of the intrusion.

The equations that satisfy the displacement vector u and the perturbation potential ϕ are given by Rundle (1980) (Eqs. 1 and 2):

$$\nabla^2 u + \frac{1}{1-2\sigma} \nabla \nabla \cdot u + \frac{\rho_0 g}{\mu} \nabla(u \cdot e_z) - \frac{\rho_0}{\mu} \nabla \phi - \frac{\rho_0 g}{\mu} e_z \nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

$$\nabla^2 \phi = -4\pi\rho_0 G \nabla \cdot u \quad (2)$$

where σ is Poisson's ratio, ρ_0 is the unperturbed density, G is the gravitational constant, g is the unperturbed surface gravitational acceleration, and μ is the rigidity. A general unique solution (Rundle 1982; Fernández *et al.* 1999) for the free surface displacements ($z = 0$) with no null components given by (Eqs. 3 and 4):

$$u_z = M \int_0^\infty x_0^1(0) J_0(kr) k dk, \quad (3)$$

$$u_r = -M \int_0^\infty y_0^1(0) J_1(kr) k dk, \quad (4)$$

and for gravity changes (Eq. 5),

$$\delta g = -\frac{d\phi}{dz} = -M \int_0^\infty q_0^1(0) J_0(kr) k dk + \beta_0 u_z. \quad (5)$$

In Eqs. (3) to (5), M represent the mass of the intrusion, J_0, J_1 are Bessel functions of the first kind, $x_0^1(0), y_0^1(0)$, and $q_0^1(0)$ are the kernel functions that depend on the wave k and on the properties of the medium, $\beta_0 = 4\pi G \rho_0$ and ρ_0, λ_0, μ_0 being the density and elastic parameters of the first layer.

A summary of the general numerical formulation to compute these solutions and the description of the computing programs, are given by Fernández and Rundle (1994a; 1994b) and Fernández *et al.* (1997; 2006).

Equations (3) to (5) can be expressed as the sum of the effects calculated for a centre of expansion, χ (representing the effect produced by pressure changes), and a point mass, φ (mass changes) (Fernández and Rundle 1994a; Fernández *et al.* 1999) (Eq. 6):

$$\varepsilon = M\varphi(r, c; \tau) + \frac{p a^3}{K} \chi(r, c; \tau) \quad (6)$$

In Eq. (6) both functions are defined in terms of the radial distance r , the depth of the intrusion c , and the set of parameters τ , that define the Earth model. τ symbolically denotes the set $(\lambda_p, \mu_p, \rho_p; d_i, \lambda_i, \mu_p, \rho_i; i = 1, \dots, p-1)$ as described previously.

The effects associated with a point mass are calculated assuming a unit mass, defined as $1MU = 10^{12} kg$. The effects due to a centre of expansion are scaled by a constant K , defined as the product of the overpressure q and the cube of the radius s of the centre of expansion, i.e., $K = qs^3$. This value represents the intensity of the centre of expansion.

Once the Earth model and the intrusion source parameters (density, overpressure, and size) are defined, the functions φ and χ depend solely on the variables r and c . Using this deformation model and historical data of volcanic activity, we can simulate

surface gravity changes that could act as precursors to a volcanic eruption. These geodetic effects are calculated using Eq. (6).

For a spherical intrusion, its mass M is calculated as $M = (4/3)\pi a^3 \rho_I$, where ρ_I is the density of the intrusion. From this relation, we can express the radius of the intrusion, a , as a function of c and the measured effects ε that could be established by a given detection limit for a geodetic instrument or technique. Thus, by knowing the depth and the detection limit, we can derive a relation of the form $a = (c, \varepsilon)$ (Eq. 7).

$$a = \left(\frac{\varepsilon}{\frac{4}{3}\pi\rho_I\varphi(r,c;\tau) + \frac{p}{qs^3}\chi(r,c;\tau)} \right)^{1/3} = a(c, r, \varepsilon, p, \rho_I; \tau), \quad (7)$$

From Eq. (7) we obtain a set of radius and depth states, for which the effects can be detected using a geodetic instrument or technique at a given radial distance. This set forms a curve on the (a, c) plane, referred to as the detection threshold or detection curve (DC). Each DC divides the plane (a, c) into two distinct regions (Fernández *et al.* 1999, Fig. 3). The area above the DC corresponds to states that would generate surface effects detectable at the given radial distance using the specified geodetic instrument or technique (detection zone), whereas the area below the DC represents states whose effects would fall below the detection capability (non-detection zone).

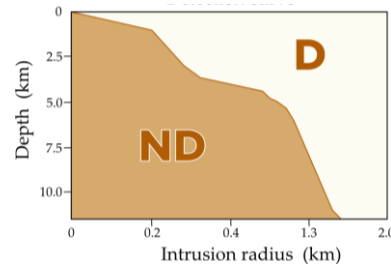


Figure 3: Example of a general detection curve, where the area ND below the curve (dark brown colour) represents states of magma intrusion (radius and depth) that the gravimeter cannot resolve or detect; and the area D above the curve represents states of magma intrusion that can be resolved or detected. Modified from Fernández *et al.* (1999).

The instruments used for detecting geodetic signals have specific sensitivity limits that must be considered when interpreting observations. Several studies have compiled these values (e.g., Fernández *et al.* 1999, 2017; Carbone *et al.* 2015; Poland *et al.* 2021; 2020; Antoni-Micollier *et al.* 2022; de Zeeuw-van Dalfsen and Poland 2023).

4. Results

To calculate the surface gravity changes for a centre of expansion (χ) and a point mass (φ) at different depths, we used the GRAVW program (Fernández *et al.* 1997; 2006). This tool computes the influence of magmatic intrusions on surface deformation based on a gravitational elastic model. The Earth model applied consists of a single elastic layer overlying a homogeneous half-space. GRAVW requires as input data (see Fig. 4) the Lamé parameters for both the elastic layer and the half-space (λ_p, μ_p, ρ_p), the layer thickness, and the source depth (Table 1).


```
&REEDIN H=30.000,C=0.0,ALAM=3.000,ALAM1=3.000,AMU=3.0000,AMU1=3.000, &END
&YINIT YSTART=1.46,DELY=1.000,X=0.00,NMYY=1,INDIC=0, &END
&GRED RHOL1=2.77000,RHOH=3.27000,RHOCT=1.00,NSTEP=150, &END
&WATER DWATER=0.00,RHOW=0.000, &END
&CHAMBER PMAGMA=1.04,RMAGMA=0.00,AMASS=1.00, &END
```

Figure 4: Model input parameters in the “.dat” file of the GRAVW software for calculating gravity changes.

Table 1: Earth model parameters

Parameters	ρ (kg/m ³)	λ (10 ¹² Pa)	μ (10 ¹² Pa)
Layer	2.77	3.0	3.0
Mantle	3.27	3.0	3.0
H (Km)	30		

Once the Earth model is defined, the parameters φ and χ depend solely on the radial distance r and the source depth c . For the case of Kīlauea, we considered a depth of 30 km for the mantle-to-crust boundary, as proposed by Wolfe *et al.* (2003), who interpreted seismic activity at this depth as related to magma intrusion into a deep dyke-like body. In contrast, magma accumulation beneath the Halema'uma'u source is assumed to occur at shallow depths, approximately 1–2 km below the surface.

The Halema'uma'u source is located at the coordinates 19.399° latitude and -155.276° longitude as Cervelli and Miklius (2003) proposed, and the locations of the gravimetric network are showing in Table 2.

Table 2: Location X, Y and Z of the gravimetric stations and the known Halema'uma'u source

	Station	Lat	Long	Z (km)
Active stations	UWEV-G	19.421	-155.291	1.23
	OUTL	19.387	-155.281	1.09
	BYRL	19.412	-155.260	1.08
	CALM	19.410	-155.274	1.09
	CALS	19.407	-155.269	1.09
New locations	KWL	19.393	-155.286	1.11
	UWB	19.425	-155.278	1.09
	OBL	19.418	-155.284	1.10
	V144	19.376	-155.293	1.05
	BM79-115	19.372	-155.284	1.04
	EOTR	19.400	-155.278	1.11
Source location		19.399	-155.276	1.11

To compute χ , we considered a pressure increase of $q = 10^3$ bar and a pressure change value of $p = 280$ bar, as proposed by (Johnson 1992). The coefficient K was calculated as $K = 10^4 (S_s)^3$ where s_s is the radial distance for each station (Table 3). The pressure increment used corresponds to the lower bound of values typically applied for active volcanic areas (Dragoni and Magnanensi 1989; Bonafede 1991; Dvorak and Berrino 1991). With these values and the application of Eq. (7), we derived the following expresión (Eq. 8):

$$a = (\varepsilon / (13.697\varphi + \frac{280}{K} \chi))^{1/3} \quad (8)$$

Using Eq. (8), we constructed DC s for the Kīlauea gravimetric network. These curves incorporate the radial

distance from the source to each station and allow us to evaluate the detection capabilities of the network for different ε values, aiding in the assessment of gravimetric detection thresholds.

Table 3: Radial distance of each station from the Halema'uma'u source

Station	Radial distance, S_s (km)
UWEV-G	2.862
OUTL	1.461
BYRL	2.196
CALM	1.211
CALS	1.142
KWL	1.247
UWB	2.822
OBL	2.189
V144	3.146
BM79-115	3.097
EOTR	0.208

We evaluate the detection capability of the permanent gravity network for magmatic intrusions based on different detection thresholds: 10 μ Gal, 20 μ Gal, and 30 μ Gal. The radial distances (r) from the inferred centre of intrusion to the stations are as follows:

- Group 1 (G1): EOTR ($r = 0.21$ km);
- Group 2 (G2): CALS, CALM, KWL, OUTL ($r = 1.1$ – 1.5 km);
- Group 3 (G3): OBL, BYRL ($r \sim 2.2$ km); and
- Group 4 (G4): UWB, UVEW, BM79-115, V144 ($r = 2.8$ – 3.15 km).

Now we discuss our results for each Group.

The first detection threshold, 10 μ Gal, corresponds to the best-case scenario (Fig. 5) applicable to both absolute and relative gravimeters. Based on the adopted forward modelling approach, the closest station (e.g., EOTR, G1) is capable of detecting magmatic intrusions with radius greater than 0.30 km at depths of approximately 30 km. In contrast, stations grouped within radial distances of 1.1 to 3.15 km (G2 to G4) are only able to detect intrusions of comparable depth when the intrusion radius exceed 0.45 km.

In the case of the Kīlauea, magma accumulation zones are mainly found in shallow areas, between 1 and 5 km depth.

The DC 's show that in areas between 1 and 3 km depth, the detection capability improves significantly, especially at stations closer to the source. For instance, EOTR can detect intrusions with radius as small as 0.06 km. G2 stations can detect intrusions with radius greater than 0.08 km, while G3 stations can detect intrusions with radius of 0.12 km or greater, similar to the most distant stations, G4.

If we consider sources at a depth of 5 km, the detection limits change. EOTR station can detect intrusions from a radius of 0.09 km; G2 stations can detect intrusions with a radius greater than 0.14 km; G3 can detect intrusions

with a radius greater than 0.15 km and, finally, G4 can detect intrusions with a radius of 0.18 km.

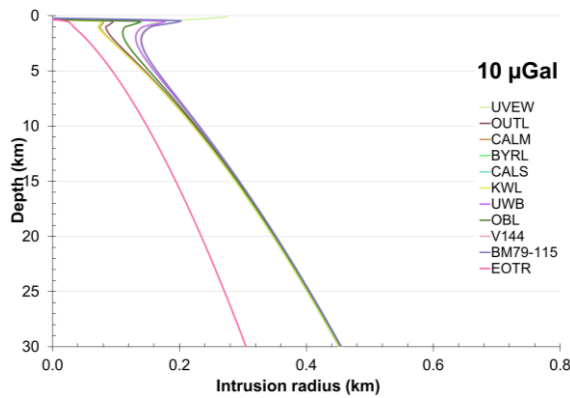


Figure 5: Detection curves for an effect of 10 µGalW.

The DCs obtained for the second detection threshold, 20 µGal, are illustrated in Figure 6. They exhibit a similar general behaviour to those at lower sensitivity, but clearly demonstrate that increasing the detection threshold leads to a decrease in sensitivity. At greater depths (~30 km), the closest station (EOTR) is capable of detecting intrusions with radius equal to or greater than 0.38 km, while the more distant stations (G2 to G4) require intrusions with radius exceeding 0.57 km to be detectable.

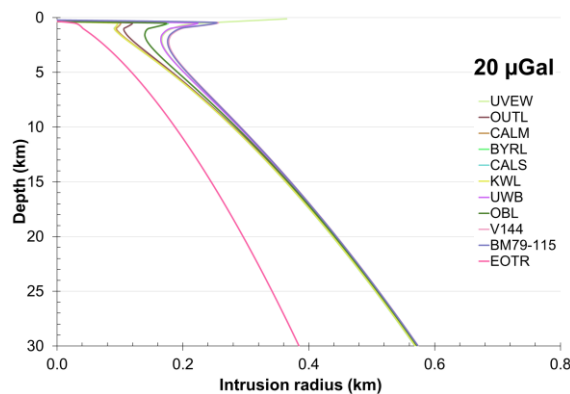


Figure 6: Detection curves for an effect of 20 µGal.

In the shallow crust (1–3 km depth), the detection capacity improves. EOTR can detect intrusions with radius greater than 0.08 km. As with the previous case, at a depth of 5 km, gravimeters are capable of detecting larger intrusions. Between 1 and 3 km, the gravimeter can detect intrusions with a radius as small as 0.10 km, while at 5 km depth, it can detect intrusions with radii starting from 0.182 km. Stations in G2 can detect intrusions with radius ≥ 0.14 km at 1–3 km depth and at depth of 5 km the instrument can detect intrusions with a radius greater than 0.18 km. Similarly, G3 can resolve intrusions with radius exceeding 0.16 km, and G4 stations can detect intrusions larger than 0.18 km in depths of 1–3 km. However, at a depth of 5 km, the radius of the intrusion must be larger to be detected, ≥ 0.2 km.

The third detection threshold, set at 30 µGal, represents the lowest sensitivity scenario considered in this study (Fig. 7). As expected, only relatively large magmatic recharges can be detected at this level. At greater

depths (~30 km), the closest station (EOTR) is capable of detecting intrusions with radius starting from 0.45 km. In contrast, the more distant stations (G2 to G4) require intrusions with radius exceeding 0.65 km to produce a detectable signal.

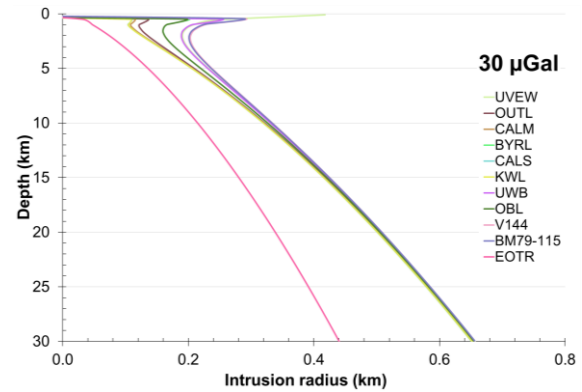


Figure 7: Detection curves for an effect of 30 µGal.

In the shallow crust (<3 km depth), although the overall detection behaviour remains consistent with that of lower thresholds, the required intrusion size increases substantially. EOTR can detect intrusions with radius greater than 0.1 km, while other stations require minimum radius exceeding 0.15 km under similar conditions to be detected. At the furthest radial distances (2.5–3.15 km), corresponding to stations in G4, the minimum detectable intrusion radius increases to approximately 0.20 km.

As in the previous cases, at a depth of 5 km, the radius of the intrusion must be larger to be detected by the instrument. For the station closest to the source (EOTR), the intrusion must have a radius of at least 0.14 km to be detected. For G2 stations, the intrusion radius must be 0.2 km or greater; for G3, the radius must be 0.22 km or more; and for G4, the most distant group from the source, the instrument can detect larger intrusions with radii starting from 0.24 km.

These results highlight the trade-off between detection sensitivity and the size of detectable bodies. Lower detection thresholds, such as 10 µGal, allow for the identification of smaller intrusions—particularly at shallow depths—whereas a 30 µGal threshold significantly restricts detection to larger magmatic sources.

5. Discussion and Conclusions

The results obtained from modelling detection curves for the permanent gravimetric network at Kilauea allow for a quantitative evaluation of the network's ability to detect magmatic intrusions of varying sizes and depths.

Instrumental sensitivity plays a critical role in detection capability. The lower detection thresholds we have considered (10 µGal) enable the identification of smaller intrusions, particularly at shallow depths, whereas higher thresholds (30 µGal) can detect only larger bodies.

Another element that has a significant influence is the radial distance from the source: closer stations have higher resolution. For example, the EOTR station (G1, ~0.2 km from the source) can detect bodies up to 0.06 km radius at shallow depth, and from 0.30 km to 30 km

depth under a threshold of 10 μGal . In contrast, more distant stations (G4) can detect magmatic intrusions with radius ≥ 0.14 km in shallow zones and ≥ 0.45 km in deep zones considering the same threshold.

The depth of the intrusion significantly affects detection efficiency. In all station groups, detection of bodies with smaller radius is possible in shallow areas than would be possible in deeper areas.

There is a clear trade-off between detection sensitivity and the minimum detectable intrusion size. Therefore, the choice of detection limit must be guided by monitoring objectives: low thresholds are ideal for the early detection of small, shallow intrusions, while higher thresholds may suffice for monitoring larger or deeper magma bodies.

The results obtained in this study provide a solid framework for optimizing the configuration and sensitivity of gravimetric networks in volcanic monitoring, enhancing the accuracy of assessments regarding eruptive potential and magmatic dynamics in active systems like Kīlauea.

Effective network deployment depends heavily on station placement relative to the source. In this study, EOTR stands out due to its proximity to the expected intrusion area. Stations at similar radial distances produce comparable detection curves. Based on this, we propose an optimized network consisting of stations EOTR, KWL, BYRL, V144, and the absolute gravimeter UWEV-G, covering distances of approximately 1, 2, and 3 km from the source (Fig. 8).

Currently, HVO operates a mixed gravimetric network at Kīlauea, composed of both absolute and relative gravimeters. This configuration is important because relative gravimeters are particularly effective for detecting magma ascent in shallow regions—especially relevant at Kīlauea, where magma is typically stored between 1 and 5 km depth. In such cases, it is crucial to collect data as close as possible to the source of mass change. Meanwhile, absolute gravimeters provide better sensitivity for detecting deeper mass variations.

Gravity measurements can be used to delineate the mechanisms of active sources, detect mass changes, and provide insights into internal processes such as magma ascent. While this method is sometimes considered less affected by weather conditions compared to techniques like gas detection or visual monitoring of fumaroles and ash. Instead, the real strength of gravity measurements lies in their ability to detect subsurface mass changes that other methods

cannot observe, such as magmatic movement in concealed voids or deep-seated reservoirs

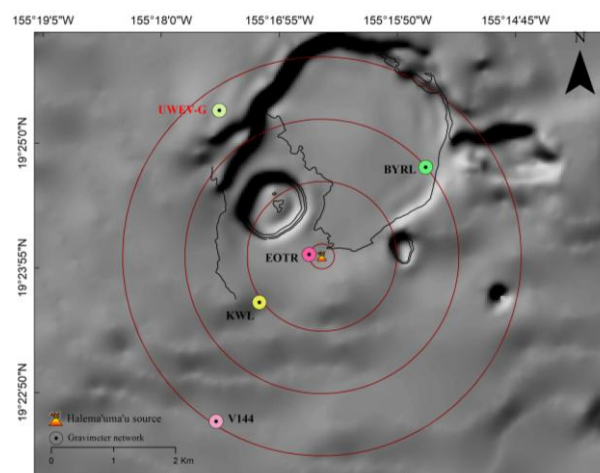


Figure 8: New gravimetric network proposed.

Maintaining a continuous monitoring network offers the potential to detect subtle changes, such as the accumulation of volatiles or small magmatic intrusions, which may serve as early indicators of new eruptive activity or changes in ongoing eruptions. Unlike microgravity surveys—which require extensive post-processing and corrections—continuous gravity monitoring is more practical and efficient for real-time applications, particularly in early warning systems.

Applying this methodology to an actively monitored volcano like Kīlauea allows for the refinement and testing of gravimetric techniques, paving the way for their application in less-studied or less-activity volcanic regions. The availability of instrumentation through HVO enables the scientific community to test and improve advanced monitoring strategies.

Finally, to strengthen this study, future steps will include the application of gravity data inversion and tidal correction techniques, which are currently under development.

Acknowledgements

This work has been supported by Spanish Agencia Estatal de Investigación (10.13039/501100011033) grant G2HOTSPOTS (PID2021-122142OB-I00).

References

- ANTONI-MICOLLIER, L., CARBONE, D., MÉNORET, V., LAUTIER-GAUD, J., KING, T., GRECO, F., and DESRUELLE, B., 2022. Detecting volcano-related underground mass changes with a quantum gravimeter. *Geophysical Research Letters*, **49**(13), e2022GL097814.
- BATTAGLIA, M., GOTTSCHMANN, J., CARBONE, D., and FERNÁNDEZ, J., 2008. 4D volcano gravimetry. *Geophysics*, **73**(6). DOI: 10.1190/1.2977792
- BONAFEDE, M., 1991. Hot fluid migration: an efficient source of ground deformation: application to the 1982–1985 crisis at Campi Flegrei-Italy. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **48**(1-2), pp. 187-198.
- CARBONE, D., ZUCCARELLO, L., MESSINA, A., SCOLLO, S., and RYMER, H., 2015. Balancing bulk gas accumulation and gas output before and during lava fountaining episodes at Mt. Etna. *Scientific reports*, **5**(1), 18049. DOI: 10.1038/srep18049

- CAYOL, V., and CORNET, F.H., 1998. Effects of topography on the interpretation of the deformation field of prominent volcanoes—Application to Etna. *Geophysical Research Letters*, **25**(11), pp. 1979–1982. DOI: 10.1029/98GL51512
- CERVELLI, P.F., and MIKLIUS, A., 2003. The Shallow Magmatic System of Kilauea Volcano. In C. Heliker, D. A. Swanson, & T. J. Takahashi (Eds.), *The Pu'u 'Ō'ō-Kūpaianaha Eruption of Kilauea Volcano, Hawai'i: The First 20 Years*, pp. 149–163. U.S Geological Survey Professional Paper.
- CHARCO, M., BRIMICH, L., and FERNÁNDEZ, J., 2002. Topography effects on the displacements and gravity changes due to magma intrusion. *Geological Carpathica*, **53**, pp. 215–221.
- CHARCO-ROMERO, M., FERNÁNDEZ-TORRES, J., and LUZÓN-MARTÍNEZ, F., 2004. Modelización de la deformación y variaciones de gravedad causadas por actividad volcánica. Universidad Complutense de Madrid.
- COOKE, A.-K., CHAMPOLLION, C., and LE MOIGNE, N., 2021. First evaluation of an absolute quantum gravimeter (AQG#B01) for future field experiments. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, **10**(1), pp. 65–79. DOI: 10.5194/gi-10-65-2021
- DE ZEEUW-VAN DALFSEN, E., and POLAND, M.P., 2023. Microgravity as a tool for eruption forecasting. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **442**. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2023.107910
- DRAGONI, M., and MAGNANENSI, C., 1989. Displacement and stress produced by a pressurized, spherical magma chamber, surrounded by a viscoelastic shell. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **56**(3-4), pp. 316–328.
- DVORAK, J.J., and BERRINO, G., 1991. Recent ground movement and seismic activity in Campi Flegrei, southern Italy: Episodic growth of a resurgent dome. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **96**(B2), 2309–2323.
- EATON, J.P., and MURATA, K.J., 1960. How Volcanoes Grow: Geology, geochemistry, and geophysics disclose the constitution and eruption mechanism of Hawaiian volcanoes. *Science*, **132**(3432), pp. 925–938. DOI: 10.1126/science.132.3432.925
- FERNANDEZ, J., and RUNDLE, J.B., 1994a. Gravity changes and deformation due to a magmatic intrusion in a two-layered crustal model. *Journal of Geophysical Research*, **99**(B2), pp. 2737–2746. DOI: 10.1029/93JB02449
- FERNÁNDEZ, J., and RUNDLE, J.B., 1994b. Fortran program to compute displacement, potential, and gravity changes resulting from a magma intrusion in a multilayered earth model. *Computers & Geosciences*, **20**(4), pp. 461–510.
- FERNÁNDEZ, J., RUNDLE, J.B., GRANELL, R.D.R., and YU, T.T., 1997. Programs to compute deformation due to a magma intrusion in elastic-gravitational layered earth models. *Computers & Geosciences*, **23**(3), pp. 231–249. DOI: 10.1016/S0098-3004(96)00066-0
- FERNÁNDEZ, J., CHARCO, M., RUNDLE, J.B., and TIAMPO, K.F., 2006. A revision of the FORTRAN codes GRAVW to compute deformation produced by a point magma intrusion in elastic-gravitational layered earth models. *Computers & geosciences*, **32**(2), pp. 275–281.
- FERNÁNDEZ, J., CARRASCO, J.M., RUNDLE, J.B., and ARAÑA, V., 1999. Geodetic methods for detecting volcanic unrest: a theoretical approach. *Bulletin of Volcanology*, **60**, pp. 534–544. DOI: 10.1007/s004450050250
- FERNÁNDEZ, J., and LUZÓN, F., 2002. Geodetic volcano monitoring in Canary Islands. Present and new perspectives. *Física de La Tierra*, **14**, pp. 109–126.
- FERNÁNDEZ, J., PEPE, A., POLAND, M.P., and SIGMUNDSSON, F., 2017. Volcano Geodesy: Recent developments and future challenges. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **344**, pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2017.08.006
- FLINDERS, A.F., 2023. The Pāhala swarm of earthquakes in Hawai'i. *Science*, **379**(6631), pp. 434–435.
- FLINDERS, A.F., 2024. Special Topic—Rapid-Response Instrumentation. *Scientific Investigations Report* 2024-5062-M. DOI: 10.3133/sir20245062M
- FOLCH, A., FERNÁNDEZ, J., RUNDLE, J.B., and MARTÍ, J., 2000. Ground deformation in a viscoelastic medium composed of a layer overlying a half-space: A comparison between point and extended sources. *Geophysical Journal International*, **140**(1), pp. 37–50. DOI: 10.1046/j.1365-246X.2000.00003.x
- JOHNSON, D.J., 1992. Dynamics of magma storage in the summit reservoir of Kilauea Volcano, Hawaii. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **97**(B2), pp. 1807–1820. DOI: 10.1029/91JB02839
- LOUGHLIN, S. C., SPARKS, R. S. J., BROWN, S. K., JENKINS, S. F., and VYE-BROWN, C. (EDS.). 2015. *Global volcanic hazards and risk*. Cambridge University Press.
- LYNN, K.J., and SWANSON, D.A., 2022. Olivine and glass chemistry record cycles of plumbing system recovery after summit collapse events at Kilauea Volcano, Hawai'i. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **426**, 107540. DOI: 10.1016/J.JVOLGEORES.2022.107540
- MCTIGUE, D.F., and STEIN, R.S., 1984. Topographic amplification of tectonic displacement: Implications for geodetic measurement of strain changes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **89**(B2), pp. 1123–1131. DOI: 10.1029/JB089IB02P01123

- MONTGOMERY-BROWN, E.K., ANDERSON, K.R., JOHANSON, I.A., POLAND, M.P., and FLINDERS, A.F., 2024. Ground Deformation and Gravity for Volcano Monitoring. In A. F. Flinders, J. B. Lowenstern, M. L. Coombs, & M. P. Poland (Eds.), *Recommended Capabilities and Instrumentation for Volcano Monitoring in the United States*. Scientific Investigations Report. DOI: 10.3133/sir20245062D.
- OKUBO, S., TANAKA, Y., UEKI, S., OSHIMA, H., MAEKAWA, T., and IMANISHI, Y., 2013. Gravity variation around Shinmoe-dake volcano from February 2011 through March 2012-Results of continuous absolute gravity observation and repeated hybrid gravity measurements. *Earth, Planets and Space*, **65**(6), pp. 563–571. DOI: 10.5047/eps.2013.03.014
- POLAND, M.P., MIKLIUS, A., and MONTGOMERY-BROWN, E.K., 2014. Magma Supply, Storage, and Transport at Shield-Stage Hawaiian Volcanoes. In M. P. Poland, T. J. Takahashi, & C. M. Landowski (Eds.), *Characteristics of Hawaiian Volcanoes*, Vol. 1801, pp. 180–234. U.S Geological Survey Professional Paper.
- POLAND, M.P., LOPEZ, T., WRIGHT, R., and PAVOLONIS, M.J., 2020. Forecasting, Detecting, and Tracking Volcanic Eruptions from Space. *Remote Sensing in Earth Systems Sciences*, **3**(1), pp. 55–94. DOI: 10.1007/S41976-020-00034-X
- POLAND, M.P., CARBONE, D., and PATRICK, M.R., 2021. Onset and evolution of Kīlauea’s 2018 flank eruption and summit collapse from continuous gravity. *Earth and Planetary Science Letters*, **567**, 117003. DOI: 10.1016/J.EPSL.2021.117003
- PRITCHARD, M.E., MATHER, T.A., MCNUTT, S.R., DELGADO, F.J., and REATH, K., 2019. Thoughts on the criteria to determine the origin of volcanic unrest as magmatic or non-magmatic. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **377**(2139). DOI: 10.1098/rsta.2018.0008
- ROTH, F., 1993. Deformations in a layered crust due to a system of cracks: Modeling the effect of dike injections or dilatancy. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **98**(B3), pp. 4543–4551. DOI: 10.1029/92JB01334
- RUNDLE, J.B., 1980. Static elastic-gravitational deformation of a layered half space by point couple sources. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **85**(B10), pp. 5355-5363.
- RUNDLE, J.B., 1982. Deformation, gravity, and potential changes due to volcanic loading of the crust. *Journal of Geophysical Research*, **87**(B13). DOI: 10.1029/jb087ib13p10729
- RUNDLE, J.B., 1983. Correction to “The deformation, gravity, and potential changes due to volcanic loading of the crust”. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **88**(B12), pp. 10647–10652. DOI: 10.1029/jb088ib12p10647
- TIZZANI, P., FERNÁNDEZ, J., VITALE, A., ESCAYO, J., BARONE, A., CASTALDO, R., PEPE, S., DE NOVELLIS, V., SOLARO, G., PEPE, A., TRAMELLI, A., HU, Z., SAMSONOV, S.V., VIGO, I., TIAMPO, K.F., and CAMACHO, A.G., 2024. 4D imaging of the volcano feeding system beneath the urban area of the Campi Flegrei caldera. *Remote Sensing of Environment*, **315**. DOI: 10.1016/j.rse.2024.114480
- USGS, 2024. Geology and History of Kīlauea | U.S. Geological Survey Available: <https://www.usgs.gov/volcanoes/kilauea/science/geology-and-history-kilauea#overview> [6/30, 2025].
- WILLIAMS, C.A., and WADGE, G., 1998. The effects of topography on magma chamber deformation models: Application to Mt. Etna and radar interferometry. *Geophysical Research Letters*, **25**(10), pp. 1549–1552. DOI: 10.1029/98GL01136
- WILLIAMS, C.A., and WADGE, G., 2000. An accurate and efficient method for including the effects of topography in three-dimensional elastic models of ground deformation with applications to radar interferometry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **105**(B4), pp. 8103–8120. DOI: 10.1029/1999jb900307
- WOLFE, C.J., OKUBO, P.G., and SHEARER, P.M., 2003. Mantle Fault Zone Beneath Kilauea Volcano, Hawaii. *Science*, **300**(5618), pp. 478–479. DOI: 10.1126/science.1082205

POSICIONAMIENTO GNSS PARA LOS VÉRTICES DE LAS GEOMETRÍAS JURÍDICAS: MÉTODO COMPARATIVO ENTRE SISTEMAS GNSS

GNSS POSITIONING FOR THE CORNERS OF LEGAL GEOMETRIES: COMPARATIVE METHOD BETWEEN GNSS SYSTEMS

Pedro Jesús Ortiz-Toro*, José Luis Berné-Valero, Natalia Garrido-Villén

Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, Edificio 7i, 46022 Valencia, España. , pjorttir@doctor.upv.es; , jlberne@cgf.upv.es; , ngarrido@cgf.upv.es

How to cite: P.J. Ortiz-Toro*, J.L. Berné-Valero y N. Garrido-Villén. 2025. Posicionamiento GNSS para los vértices de las geometrías jurídicas. Método comparativo entre sistemas GNSS. En libro de actas: *Quinto Congreso en Ingeniería Geomática*. Valencia, 2 – 3 de Julio de 2025. <http://dx.doi.org/10.4995/CIGeo2025.2025.19849>

Resumen:

Este estudio evaluó la eficiencia y precisión de diversas técnicas del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) para la captura de datos georreferenciados relevantes para la definición legal de límites de propiedad, según lo exige la legislación española. La investigación tuvo como objetivo identificar el método más preciso, considerando el equilibrio entre precisión y eficiencia. Las técnicas GNSS comparadas incluyeron posicionamiento cinemático en tiempo real (RTK) utilizando correcciones de red (RAP y SmartNet), RTK conectado a la estación de referencia más cercana de estas redes, posicionamiento preciso de puntos (PPP) y cinemático post-procesado (PPK). Para establecer un punto de referencia, se determinaron coordenadas de control de alta precisión para dos marcadores terrestres mediante una observación GNSS estática de una hora, post-procesada utilizando tres estaciones de referencia cercanas de la Red de Posicionamiento de Andalucía (RAP). Se realizaron observaciones posteriores en cuatro fechas diferentes utilizando los métodos GNSS mencionados. Se analizaron las diferencias planimétricas entre las coordenadas obtenidas por cada método y las coordenadas de control. Los resultados indicaron que los métodos RTK que emplean correcciones de red y PPK generalmente exhibieron las diferencias planimétricas más pequeñas, típicamente del orden de unos pocos centímetros. El Posicionamiento Preciso de Puntos (PPP) también arrojó diferencias planimétricas relativamente pequeñas, aunque ligeramente mayores que los resultados RTK más precisos. Por el contrario, el RTK conectado a la estación de referencia más cercana mostró una mayor variabilidad en la precisión, con diferencias que alcanzaron el nivel decímetro en algunos casos, posiblemente debido a inconsistencias en la estación de referencia más cercana (RON1). En conclusión, el estudio sugiere que las soluciones de red RTK y el PPK son las técnicas más eficientes para la captura de datos georreferenciados de alta precisión para geometrías jurídicas. El PPP se presenta como una alternativa con precisión razonable, especialmente en áreas sin cobertura telefónica.

Palabras clave: Catastro, Registro de la Propiedad, Deslinde, GNSS RTK, PPK, PPP

Abstract:

This study evaluated the efficiency and accuracy of various Global Navigation Satellite System (GNSS) techniques for the capture of georeferenced data relevant to the legal definition of property boundaries, as mandated by Spanish legislation. The research aimed to identify the most precise method while considering the balance between accuracy and efficiency. The GNSS techniques compared included Real-Time Kinematic (RTK) positioning utilizing network corrections (RAP and SmartNet), RTK connected to the nearest reference station of these networks, Precise Point Positioning (PPP), and Postprocessed Kinematic (PPK). To establish a benchmark, high-precision control coordinates were determined for two ground markers through a one-hour static GNSS observation, post-processed using three nearby reference stations from the Andalusian Positioning Network (RAP). Subsequent observations were conducted on four different dates using the aforementioned GNSS methods. The planimetric differences between the coordinates obtained by each method and the control coordinates were analyzed. The results indicated that RTK methods employing network corrections and PPK generally exhibited the smallest planimetric differences, typically on the order of a few centimeters. Precise Point Positioning (PPP) also yielded relatively small planimetric differences, although slightly larger than the most accurate RTK results. In contrast, RTK connected to the nearest reference station showed greater variability in accuracy, with differences reaching up to the decimeter level in some instances, potentially due to inconsistencies at the nearest reference station (RON1). In conclusion, the study suggests that network RTK solutions and PPK are the most efficient techniques for capturing high-precision georeferenced data for legal boundaries. PPP is presented as a reasonably accurate alternative, particularly in areas with limited or no cellular network coverage.

Key words: Cadaster, Land Registry, Bounday demarcation, GNSS RTK, PPK, PPP

* Corresponding Author: Pedro Jesús Ortiz-Toro, pjorttir@doctor.upv.es

1. Introducción

La ley 13/2015 introdujo la inscripción, en el Registro de la Propiedad, de la georreferenciación de las fincas registrales que definen los límites de las propiedades mediante procedimientos de notificación a los propietarios colindantes. En este marco, el solicitante tiene la facultad de proponer un límite georreferenciado que, en ausencia de objeciones por parte de los propietarios vecinos, se registra oficialmente. Aunque es común la elaboración de reglamentos que detallen y complementen las disposiciones legales, en este caso no se ha promulgado una normativa específica. No obstante, se han publicado varias resoluciones conjuntas entre la Dirección General del Catastro (DGC) y la Dirección General de los Registros y el Notariado (DGRN), actualmente denominada Dirección General de Seguridad Jurídica y Fe Pública (DGSJFP).

Estas resoluciones han establecido el alcance técnico relacionado con el contenido de la información que debe ser intercambiada entre los Registros y el Catastro. Sin embargo, no se han especificado de manera detallada los métodos técnicos para la captura de la información georreferenciada, ni tampoco se han definido de manera coherente los parámetros como precisiones, tolerancias u otros aspectos fundamentales para garantizar la fiabilidad de los datos protegidos por el Registro de la Propiedad.

La Resolución de 29 de octubre de 2015 (BOE-A-2015-11655), establece, en su punto séptimo, los requisitos que deben cumplir tanto la descripción técnica como la representación gráfica alternativa de las fincas aportadas al Registro de la Propiedad. En relación con la precisión de la información contenida en los archivos GML derivados de levantamientos topográficos, la resolución especifica que el error máximo absoluto no debe exceder los 25 centímetros y que el 85 % de los puntos del perímetro georreferenciado deben presentar un error máximo absoluto inferior a 20 centímetros.

1.1. Metodología GNSS

Las técnicas de observación del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) constituyen un pilar fundamental en la geodesia moderna, permitiendo la determinación de coordenadas con precisiones que varían desde metros hasta milímetros. Entre las diversas metodologías disponibles, el Posicionamiento Estático relativo postproceso o tiempo real, el Tiempo Real Cinemático (RTK) y el Posicionamiento Puntual Preciso (PPP) representan tres enfoques principales, cada uno con principios operativos, requisitos y precisiones características.

El Posicionamiento Estático relativo es una técnica tradicional que se basa en la observación simultánea de señales GNSS por dos o más receptores estacionarios durante un período de tiempo extendido (Anquela-Julián *et al.* 2013). Uno de los receptores se ubica sobre un punto de control de coordenadas conocidas, actuando como estación de referencia, mientras que los demás se sitúan en los puntos cuya posición se pretende determinar.

La precisión alcanzable mediante el posicionamiento estático está directamente influenciada por la duración

de la sesión de observación, la longitud de la línea base entre los receptores, el número y la geometría de los satélites visibles, y la capacidad del receptor para procesar múltiples frecuencias (Teunissen and Kleusberg 1998). Tras la adquisición de los datos, se realiza un post-procesamiento para calcular las coordenadas precisas de los puntos desconocidos, usualmente mediante el método de dobles diferencias de fase portadora, lo que permite alcanzar precisiones milimétricas en líneas base cortas (De Jonge 1998). Este método es ampliamente utilizado para el establecimiento de marcos de referencia geodésicos y levantamientos topográficos de alta precisión.

En contraste, el Tiempo Real Cinemático (RTK) es una técnica de posicionamiento GNSS que proporciona coordenadas con precisión centimétrica en tiempo real (Martín *et al.* 2012; Vollath *et al.* 2000; Wu *et al.* 2008; Odijk *et al.* 2010). El principio fundamental del RTK reside en la transmisión de correcciones diferenciales desde una estación base (con coordenadas conocidas) a un receptor móvil (rover) en tiempo real (Teunissen and Kleusberg 1998). Estas correcciones, que incluyen información sobre los errores de órbita, reloj y atmosféricos, se envían a través de un enlace de comunicación inalámbrico, como radio o internet. El receptor rover utiliza estas correcciones para resolver las ambigüedades de fase portadora de manera eficiente y calcular su posición con alta exactitud con solo unos pocos segundos o minutos de observaciones (Teunissen 1995). Existen diversas implementaciones de RTK, incluyendo el RTK de base única y el RTK de red (NRTK), este último utilizando múltiples estaciones de referencia para generar correcciones mejoradas en áreas extensas (Vollath *et al.* 2000; Wu *et al.* 2008; Odijk *et al.* 2010). El RTK es esencial en aplicaciones que requieren posicionamiento preciso y dinámico, como la topografía, la construcción, la agricultura de precisión y el guiado de vehículos.

El Posicionamiento Puntual Preciso (PPP) es una técnica de posicionamiento GNSS que permite obtener coordenadas de alta precisión (centimétrica a decímetro) utilizando las observaciones de un único receptor GNSS (Zumberge *et al.* 1997; Kouba and Héroux 2001; Van Bree *et al.* 2009). A diferencia del RTK, el PPP no depende de una estación base local con coordenadas conocidas en tiempo real. En su lugar, el PPP se basa en el empleo de productos orbitales y de reloj de alta precisión generados por redes GNSS globales, como el Servicio Internacional GNSS (IGS) (Kouba and Héroux 2001). El receptor PPP procesa las observaciones de pseudodistancia y fase portadora, junto con la información precisa de los satélites, para estimar su posición, los errores del reloj del receptor y las ambigüedades de fase. Una característica distintiva del PPP es su mayor tiempo de convergencia en comparación con el RTK, ya que las ambigüedades de fase iniciales se estiman como valores reales (flotantes) y requieren un período de tiempo para converger a valores enteros (Zumberge *et al.* 1997). No obstante, el PPP ofrece la ventaja de la operación autónoma sin la necesidad de infraestructura local. Recientemente se ha integrado el sistema PPP al RTK, generando un nuevo método PPP/RTK.

1.2. Normativa sobre la información georreferenciada

La incorporación de una representación gráfica georreferenciada alternativa (RGGA) al Registro de la Propiedad es un mecanismo previsto legalmente para complementar la descripción literaria de una finca con una delimitación geográfica precisa. Este proceso requiere el cumplimiento de una serie de requisitos técnicos, con especial atención a las tolerancias exigidas al comparar la RGGA con la representación catastral.

En primer lugar, la RGGA debe ser aportada y aprobada expresamente por el propietario de la finca o por la autoridad judicial o administrativa competente que haya tramitado el procedimiento. La delimitación geográfica de la finca debe realizarse mediante la expresión de las coordenadas georreferenciadas de los vértices de todos sus elementos. Esta información debe estar contenida en un fichero informático en formato GML (Geography Markup Language), siguiendo la estructura prevista en el Anexo de la Resolución de 26 de octubre de 2015 (BOE-A-2015-11652). Los datos del fichero GML deben corresponderse con la descripción y superficie de la parcela cuya inscripción se solicita.

Además, la RGGA debe estar representada sobre la cartografía catastral, respetando la delimitación de la finca matriz o del conjunto de fincas aportadas que resulte de la misma, indicando claramente las partes afectadas o no afectadas. El conjunto de todas las parcelas catastrales resultantes debe respetar la delimitación que conste en la cartografía catastral. El cumplimiento de estos requisitos puede acreditarse mediante una representación gráfica suscrita por técnico competente, aprobada por la autoridad correspondiente u obtenida mediante digitalización sobre la cartografía catastral. Si la RGGA es suscrita por un técnico, deberá incluir la fecha de realización, datos del solicitante, metodología utilizada, datos de identificación de las parcelas catastrales afectadas, la representación gráfica de cada parcela resultante sobre la cartografía catastral, la superficie obtenida y un listado de coordenadas de sus vértices. El técnico deberá declarar bajo su responsabilidad el cumplimiento de las especificaciones técnicas, incluyendo una topología de tipo recinto sin auto intersecciones, superposiciones ni huecos.

Un elemento fundamental para la incorporación y coordinación de una RGGA es la obtención de un informe de validación gráfica alternativo (IVGA) positivo emitido por la Dirección General del Catastro. Este informe acredita el cumplimiento de los requisitos técnicos y es indispensable para lograr la coordinación entre el Catastro y el Registro de la Propiedad. La falta de un IVGA positivo impedirá la coordinación de la RGGA.

La única referencia en la normativa analizada sobre precisiones es la alusión a las tolerancias exigidas para la Representación Gráfica Georreferenciada Alternativa, en comparación entre la RGGA y la cartografía catastral, tanto en cartografía urbana (+0,50 metros y -0,50 metros) como rústica (+2,00 metros y -2,00 metros), así como la diferencia de superficie no superior al 5%, que son los únicos parámetros definidos en la normativa técnica para establecer la denominada "identidad gráfica".

2. Caso de estudio

La determinación de los vértices de una geometría jurídica viene dada por el consentimiento de los afectados, estableciendo unas señales sobre el terreno, y sobre las cuales se calcula el posicionamiento mediante sus coordenadas georreferenciadas.

Con el propósito de suplir la falta de concreción normativa respecto a la determinación de tolerancias, y considerando que la fiabilidad del dato registral puede tener implicaciones legales significativas para los titulares o terceros, se plantea la evaluación de la metodología más eficiente para la captura de datos georreferenciados. Para ello, se ha diseñado un estudio comparativo entre diversas técnicas de observación GNSS, con el objetivo no solo de identificar la más precisa, sino también aquella que optimice la relación entre precisión y eficiencia en términos de tiempos de observación y cálculo.

Los puntos seleccionados, para esta monitorización, consisten en dos clavos materializados sobre el terreno. La zona de estudio se encuentra en la localidad de San Pedro Alcántara (Málaga). En primer lugar, se realizará una observación estática de larga duración (1 hora) sobre estos puntos, cuyos datos serán post-procesados y ajustados utilizando las tres estaciones de referencia GNSS más cercanas. Este procedimiento proporcionará coordenadas de alta precisión para los clavos, las cuales se emplearán como patrón de comparación en el análisis posterior.

Los métodos GNSS de observación con corrección de observable pueden ser de diversos tipos, en postproceso o en tiempo real, dejando sin tratar el estático relativo postproceso, al considerarlo un ajuste riguroso.

La solución en tiempo real puede ofrecerse en dos tipos de servicios de corrección GNSS:

- El primero es la representación del espacio de observación (OSR). En este método, el servicio calcula el error esperado en la ubicación de cada rover específico y transmite esta información directamente al dispositivo rover RTK, caso NTRIP.
- El otro método recibe el nombre de representación del espacio de estados (SSR). En este caso, se monitorizan los errores de la señal GNSS y luego se utilizan para modelar físicamente los errores en una región completa, en el llamado modelo de «espacio de estados». Los datos que describen el modelo en un momento determinado se transmiten a los rovers de la zona de cobertura, caso PPP.

En este artículo se va a tratar los siguientes casos:

- Solución OSR. RTK-Ntrip mediante un solo receptor GNSS conectado a dos redes de referencia GNSS (RAP y SmartNet).
- Solución OSR. RTK-Estación Cercana mediante un solo receptor GNSS conectado a dos redes de referencia GNSS (RAP y SmartNet).
- Solución SSR PPP mediante un solo receptor.
- Solución estática post-proceso. PPK mediante dos receptores, una base que se colocaría en lugar aleatorio observando en estático y de modo

simultáneo, el receptor móvil observa los puntos de control.

El estudio contempla la observación con estos métodos durante cuatro semanas en sesiones alternas de mañana y tarde. El equipo de campo utilizado consta de dos receptores Leica GS16 i GS18i con trípode, bases nivelante y bípodes. El equipo de oficina utilizado consta de la aplicación Infinity de Leica (Leica Geosystems AG, 2025), con el módulo de post-proceso y ajuste de redes y con una licencia de uso por un mes de SmartNet-Pro (Cygnus 2025), que incluye acceso a correcciones en tiempo real, así como correcciones PPP.

La primera observación GNSS con el objeto de calcular el posicionamiento de los puntos de control fue realizado el día 28 de enero 2025. Cada uno de los receptores GNSS, GS16 y GS18i, permanecieron estacionados mediante bípode durante algo más de una hora, concretamente desde las 9h55 hasta las 11h05. Para el cálculo de postproceso se utilizaron las estaciones de referencia de la Red Andaluza de Posicionamiento (RAP), MLGA, RON1 y ALGC, emplazadas en Málaga, Ronda y Algeciras, respectivamente. Una vez procesadas las baselíneas se realizó ajuste de red por mínimos cuadrados fijando las 3 estaciones de referencia de la RAP. El resultado del cálculo, para los puntos de control, se refleja en la Tabla 1. En la Figura 1 se muestra la localización de los puntos respecto a las estaciones de referencia y en la Figura 2 su entorno próximo.

Tabla 1: Coordenadas de puntos de control, S.R. ETRS89 UTM H30N

Punto	X (m)	Y (m)
1	321321.53	4038769.11
2	321355.57	4038784.04

Las siguientes observaciones se produjeron los días 31 de enero y 4, 13 y 19 de febrero. Para cada una de estas observaciones la metodología fue la siguiente:

- Estacionando el receptor GS16, en un lugar aleatorio cercano a los puntos de control, sobre trípode con base nivelante, se inició en modo RTK y simultáneamente ese receptor almacenaba datos brutos. En una primera tanda de observaciones, se tomaron los dos puntos de control mediante el receptor GS18i usando para ello jalón de 2 metros de altura y el sistema Tilt de Leica que permite obtener posicionamiento preciso, aunque el jalón no esté aplomado.
- Una vez finalizada la observación desde la base ocupada con el receptor GS16, dejamos éste observando en estático para tener una suficiente cantidad de observables para postproceso.
- Es en este momento cuando cambiamos al modo RTK enlazando a una red de estaciones de referencia, concretamente la red RAP, observando en los modos de observación, estación cercana (en este caso ROND1, en Ronda) y solución de red. Una vez concluida la observación de los dos puntos en esta red (RAP) se cambia a la red SmartNet de Leica Geosystems, observando de modo análogo los dos puntos.

- Finalmente, desconectamos el receptor GS18i de la red de estaciones de referencia, y procedemos con la última tanda de observaciones en modo PPP, para lo cual se necesitó un periodo de convergencia de unos 5 minutos.

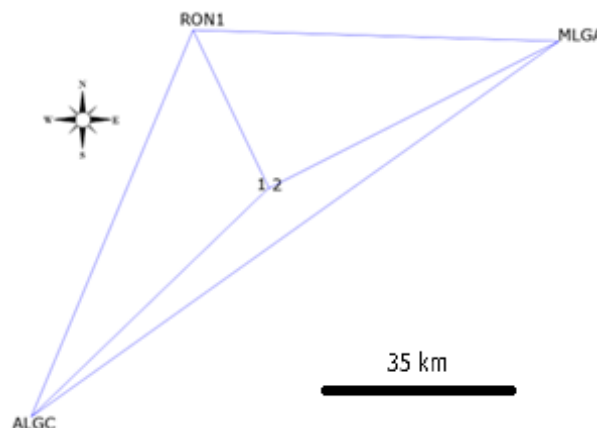


Figura 1: Situación de puntos de control y estaciones de referencia GNSS.



Figura 2: Entorno de los puntos de control.

La nomenclatura para cada uno de los puntos (1 y 2) según el método de observación es el siguiente:

- **PPK:** corrección cinemática (PPK) desde base GS16 postprocesada
- **SMNV/C:** solución de Red / estación cercana SmartNet
- **RAPV/C:** solución de Red / estación cercana RAP
- **PPP:** solución convergida PPP

Tabla 2: Coordenadas (X, Y) de los puntos calculados en metros.

Punto	Fechas de observación			
	31/01/2025	04/02/2025	13/02/2025	19/02/2025
1PPK	321321.53, 4038769.14	321321.51, 4038769.10	321321.54, 4038769.11	321321.53, 4038769.11
2PPK	321355.58, 4038784.06	321355.57, 4038784.02	321355.59, 4038784.02	321355.58, 4038784.02
1SMNV	321321.53, 4038769.10	321321.53, 4038769.09	321321.52, 4038769.11	321321.54, 4038769.12
2SMNV	321355.56, 4038784.02	321355.57, 4038784.02	321355.56, 4038784.02	321355.58, 4038784.03
1SMNC	321321.58, 4038769.20	321321.46, 4038769.32	321321.55, 4038769.24	321321.53, 4038769.12
2SMNC	321355.57, 4038784.15	321355.57, 4038784.02	321355.64, 4038784.21	321355.56, 4038784.02
1RAPV	321321.54, 4038769.11	321321.54, 4038769.10	321321.53, 4038769.10	321321.53, 4038769.12
2RAPV	321355.57, 4038784.03	321355.57, 4038784.02	321355.58, 4038784.02	321355.57, 4038784.04
1RAPC	321321.58, 4038769.20	321321.57, 4038769.38	321321.65, 4038769.21	321321.53, 4038769.12
2RAPC	321355.62, 4038784.14	321355.61, 4038784.32	321355.72, 4038784.13	321355.57, 4038784.04
1PPP	321321.52, 4038769.07	321321.59, 4038769.15	321321.54, 4038769.08	321321.55, 4038769.08
2PPP	321355.58, 4038783.98	321355.62, 4038784.08	321355.59, 4038783.99	321355.59, 4038783.99

El resultado del cálculo de coordenadas, para para cada día de observación, se refleja en la Tabla 2. La diferencia (distancia planimétrica) entre coordenadas de control y calculados para cada día de observación, se refleja en la Tabla 3.

Tabla 3: Diferencias para cada día de observación, entre puntos de control y calculados.

Punto	31/01/25 (m)	04/02/25 (m)	13/02/25 (m)	19/02/25 (m)
1PPK	0.03	0.03	0.00	0.01
2PPK	0.02	0.01	0.03	0.02
1SMNV	0.02	0.03	0.01	0.01
2SMNV	0.02	0.01	0.02	0.01
1SMNC	0.10	0.22	0.13	0.01
2SMNC	0.11	0.02	0.19	0.02
1RAPV	0.01	0.01	0.01	0.00
2RAPV	0.01	0.02	0.01	0.00
1RAPC	0.10	0.27	0.15	0.01
2RAPC	0.11	0.29	0.18	0.01
1PPP	0.04	0.07	0.04	0.03
2PPP	0.06	0.06	0.05	0.04

3. Conclusiones

Las conclusiones del estudio, según los resultados obtenidos por cada método GNSS, indican que los métodos RTK que utilizaron correcciones de red (RAPV y SMNV) y el método cinemático con post-procesamiento (PPK) generalmente mostraron las diferencias planimétricas más pequeñas en comparación con las coordenadas de control establecidas mediante una observación estática de larga duración. Estas diferencias se mantuvieron en el orden de pocos centímetros en la mayoría de las observaciones para ambos puntos analizados. Las condiciones de horizonte GNSS son buenas por lo que

desconocemos el impacto que pudiera tener en un entorno menos óptimo. Quizá podría ser analizado en un estudio donde las condiciones fueran peores.

En cuanto al Posicionamiento Puntual Preciso (PPP), los resultados obtenidos también presentaron diferencias planimétricas relativamente pequeñas, aunque ligeramente mayores en comparación con los resultados más precisos del RTK de red y PPK.

Por otro lado, los métodos RTK que se conectaron a la estación de referencia más cercana de las redes SmartNet y RAP exhibieron una mayor variabilidad en la precisión, presentando en algunos casos diferencias planimétricas más significativas, llegando incluso a alcanzar el orden de los decímetros. Esto se debió a que la estación más cercana fue Ronda (RON1) y ésta ya mostró incoherencias en los cálculos de postproceso para la base PPK. Sin embargo, el último día de observación estas incoherencias desaparecieron en las observaciones en estático y ello se tradujo en unos mejores resultados RTK estación cercana para ese último día de pruebas.

En resumen, el estudio sugiere que, para la captura de datos georreferenciados con la mayor precisión, las soluciones RTK de red y PPK son las técnicas más eficientes para el posicionamiento de vértices de las geometrías jurídicas. El método PPP se presenta como una alternativa con una precisión razonable, sobre todo en zonas donde no exista cobertura de telefonía.

Dado que la normativa vigente catastral, establece una tolerancia poco acertada (20 ó 25 cm) creemos que se debería imponer para los vértices de las geometrías jurídicas unas tolerancias máximas de 4 centímetros, que son perfectamente asumibles con la tecnología actual.

Agradecimientos

Por cortesía de Leica Geosystems España, se ha contado con una licencia de uso por un mes de SmartNet-Pro.

References

- ANQUELA-JULIÁN, A.B., MARTÍN-FURONES, Á.E., BERNÉ-VALERO, J.L. and PADÍN-DEVESA, J., 2013. GPS and GLONASS Static and Kinematic PPP results. *Journal of Surveying Engineering*, **139**(1), pp.47-58. DOI: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000091
- BOE-A-2015-11652. Resolución de 26 de octubre de 2015, de la Dirección General del Catastro, por la que se regulan los requisitos técnicos para dar cumplimiento a las obligaciones de suministro de información por los notarios establecidas en el texto refundido de la Ley del Catastro Inmobiliario. Available: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2015-11652 [6/30, 2025].
- BOE-A-2015-11655 Resolución de 29 de octubre de 2015, de la Subsecretaría, por la que se publica la Resolución conjunta de la Dirección General de los Registros y del Notariado y de la Dirección General del Catastro, por la que se regulan los requisitos técnicos para el intercambio de información entre el Catastro y los Registros de la Propiedad. Available: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2015-11655> [6/30, 2025].
- CYGNUS, 2025, SmartNet-Pro - Cygnus Systems. Available: <https://www.cygnus-systems.com/en-gb/smartnet/smartnet-pro/> [6/30, 2025].
- DE JONGE, P.J., 1998. *A processing strategy for the application of the GPS in networks*. Netherlands Geodetic Commission.
- KOUBA, J. and HEROUX, H., 2001. Precise point positioning using IGS orbit and clock products. *GPS Solutions*, **5**, pp. 12-28.
- LEICA GEOSYSTEMS AG, 2025. Software topográfico Leica Infinity | Leica Geosystems. Available: <https://leica-geosystems.com/es-es/products/gnss-systems/software/leica-infinity> [6/30, 2025].
- MARTÍN, A., ANQUELA, A.B., BERNÉ, J.L., and SANMARTIN, M. (2012). Kinematic GNSS-PPP results from various software packages and raw data configurations. *Scientific Research and essays*, **7**(3), pp. 419-431.
- ODIJK, D., VERHAGEN, S., TEUNISSEN, P.J.G., HERNANDEZ-PAJARES, M., JUAN, M.J., SANZ, J., SAMSON J. and TOSSAINT M., 2010. LAMBDA-Based Ambiguity Resolution for Next-Generation GNSS Wide Area RTK. *Proceedings of the 2010 International Technical Meeting of the Institute of Navigation, San Diego, California, USA*.
- TEUNISSEN, P.J.G., 1995. The least squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS integer ambiguity estimation. *Journal of Geodesy*, **70**, pp. 65-82.
- TEUNISSEN, P.J.G. and KLEUSBERG, A., 1998. *GPS for Geodesy*, 2nd edition. Springer-Verlag.
- VAN BREE, R.J., TIBERIUS, C.C., and HAUSCHILD, A., 2009. Real time satellite clocks in single frequency precise point positioning. In *Proceedings of the 22nd international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation (ION GNSS 2009)*, pp. 2400-2414.
- VOLLATH, U., DEKING, A., LANDAU, H., PAGELS, C. and WAGNER, B., 2000. Multi-base RTK positioning using Virtual Reference Stations. *Proceedings of the ION GPS 2000, Salt Lake City, Utah, USA*.
- WU, S.Q., ZHANG, K.F. and SILCOCK, D., 2008. An Investigation of Performance Difference of Regional Atmospheric Models for Network RTK— A Case Study in Victoria. *Proceedings of International Symposium on GPS/GNSS 2008, Tokyo, Japan*.
- ZUMBERGE, J., HEFLIN, M., JEFFERSON, D., WATKINS, M.M. and WEBB, F.H., 1997. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research*, **102**, pp. 5005-5017.

IMPACT OF TOPOGRAPHY AND EARTHWORKS IN UTILITY-SCALE PHOTOVOLTAIC PROJECTS

IMPACTO DE LA TOPOGRAFÍA Y MOVIMIENTOS DE TIERRA EN PROYECTOS FOTOVOLTAICOS TIPO UTILITY

Conrado García-Salinas^{a,*}, Ángel Martín-Furones^b, Ana Belén Anquela-Julián^b

^a Grupotec Servicios Avanzados S.A, Avda. Tarongers 33, Poblats Maritims, 46011 Valencia, Spain. , cgarcia@grupotec.es

^b Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, Camino de vera s/n, 46022 Valencia, Spain. , aemartin@upvnet.upv.es; , anquela@cgf.upv.es

How to cite: C. García-Salinas, Á. Martín-Furones y A.B. Anquela-Julián. 2025. Impact of topography and earthworks in Utility-Scale photovoltaic projects. En libro de actas: *Quinto Congreso en Ingeniería Geomática*. Valencia, 2 – 3 de Julio de 2025. <http://dx.doi.org/10.4995/CIGeo2025.2025.19854>

Abstract:

In recent years, due to the increase in the number of PV projects worldwide, flat land for PV projects has become scarce. More and more projects are being built on steep terrain. The civil works associated with these topographies have a substantial weight in both the CAPEX and the schedule, and have numerous interactions with other facets of the project such as environmental impact, energy generation, irradiation on the modules, hydrology, etc. The objective of this thesis is to characterise and quantify these interactions in order to gain efficiency in the design and construction of this type of projects. Specifically, three dimensions are studied: the reduction of earth movement, the impact on energy generation and the impact on the environment. Firstly, work has been carried out on mathematical modelling at the structural level of the plant, with the aim of implementing an algorithm to optimise the position of the structures and reduce the associated earthworks in the early stages of the design. The results show that a reduction of the total amount is possible using a simple algorithm based on the mathematical model developed. In addition, work is currently underway to quantify the mismatch losses associated with different factors. For this purpose, real data from panels and structures have been taken and modelled under various conditions. It is hoped that knowledge will be gained to improve production estimates. Finally, a field study has been planned to investigate the importance of vegetation in plant hydrology, as well as methods to maintain this vegetation during dry periods. The intention is to see which methods are most suitable for preventing erosion and landslides and to see if they are feasible from a technical-economic point of view.

Key words: Geomatics, Modelling, Simulation, Mismatch, Civil works, Hidrology

Resumen:

En los últimos años, y debido al incremento de proyectos fotovoltaicos en todo el mundo, los terrenos llanos para este tipo de implantaciones han comenzado a escasear. Hay cada vez más proyectos que se construyen en terrenos escarpados. La obra civil asociada a estas topografías tiene un peso substancial tanto en el CAPEX como en el cronograma, y tiene numerosas interacciones con otras facetas del proyecto como el impacto medioambiental, la generación de energía, la irradiación sobre los módulos, hidrología etc. El objetivo de esta tesis es caracterizar y cuantificar estas interacciones para ganar eficiencia en el diseño y construcción de este tipo de proyectos. En concreto se estudian 3 dimensiones: la reducción del movimiento de tierras, el impacto en la generación energética y el impacto en el medio ambiente. Primeramente, se ha trabajado en un modelado matemático a nivel estructural de la planta, con el objetivo de implementar un algoritmo para optimizar la posición de las estructuras y reducir el movimiento de tierras asociado en fases tempranas del diseño. Los resultados muestran que es posible una reducción de la cantidad total mediante un algoritmo simple basado en el modelo matemático desarrollado. Además, se está trabajando actualmente en diversos estudios para cuantificar las pérdidas por *mismatch* asociadas a diferentes factores. Para ello se han tomado datos reales de paneles y estructuras y se han modelado en diversas condiciones. Se espera obtener conocimiento para la mejora de las estimaciones de producción. Finalmente se ha planteado un estudio de campo para investigar la importancia de la vegetación en la hidrología de la planta, así como métodos para mantener esta vegetación durante períodos secos. La intención es ver qué métodos son más idóneos para prevenir la erosión y el deslizamiento de tierras y ver si son viables desde un punto de visto técnico-económico.

Palabras clave: Geomática, Modelado, Simulación, Mismatch, Obra civil, Hidrología

* Corresponding Author: Conrado García-Salinas, cgarcia@grupotec.es

1. Introduction

The surging global demand for renewable energy has propelled photovoltaic (PV) technology to the forefront of sustainable energy initiatives, with a heightened focus on optimizing the deployment of solar structures (Bóraswski *et al.* 2023). As the PV industry matures, the intricacies of civil engineering within PV projects have gained prominence, emphasizing the need for efficiency in structural design (Al Garni and Awasthi 2018). The increasing scarcity of flat terrain suitable for PV installations has resulted in more projects being developed on steep or irregular land, where civil works acquire a critical role, not only in terms of cost and schedule but also in their environmental energetic consequences.

This growing complexity highlights the intersection between geomatics, civil engineering, and algorithmic development. Specifically, there is a pressing need for tools capable of optimizing the position of structures during the early stages of design, aiming to reduce earthworks, accelerate project development, and mitigate environmental impacts.

In this context, a lightweight optimization algorithm based on mathematical modeling of plant layouts has been developed, with particular emphasis on accessibility and usability during tender phases, where rapid and license-free solutions are highly valuable. The goal is to be able to estimate the amount of earthworks associated to a particular layout, in order to compare different options during the first steps of the design process.

Parallel to these efforts, optimizing energy performance in PV plants situated on complex terrains demands a detailed assessment of irradiance variability across the site. As PV plants increasingly incorporate bifacial modules and single-axis trackers, small differences in orientation, shading, or slope can generate significant mismatch losses, which traditional evaluation methods often fail to capture.

Furthermore, precise monitoring of solar irradiance is fundamental for operational performance evaluation and performance ratio (PR) assessment. Although pyranometers are standard for measuring plane-of-array (POA) irradiance, deploying them on every tracker is infeasible in utility-scale plants. Advances in geomatic simulation, including clear-sky modeling, hillshade analysis using digital elevation models (DEMs), and bifacial irradiance estimation, enable more sophisticated, optimization-based strategies for representative sensor placement, addressing a significant gap in current practices (Li *et al.* 2024a; Li *et al.* 2024b).

The main goal is to investigate if geometrically informed algorithms can be used for sensor placement without the need for a complex irradiation model.

Finally, the increasing frequency of extreme meteorological events, such as the floods observed in Valencia in October 2024 (El País 2024), underscores the critical role of hydrological management in PV plants. In a context of swift climate change, preparing for extreme weather events is of paramount importance (Aposporis 2023).

This research integrates geomatic modeling, civil engineering optimization, and environmental assessment to advance the design and construction of PV plants on complex terrains, fostering more efficient, resilient, and sustainable renewable energy systems.

2. State of the art

The challenges associated with the deployment of photovoltaic plants on complex terrains have driven a significant body of research addressing civil works, energy performance, and environmental impacts.

In the field of civil engineering, minimizing earth movement has emerged as a key objective due to its economic and ecological implications. Extensive land grading not only increases project costs but also generates severe environmental disturbances, including habitat loss, soil erosion, and hydrological alteration (Pimentel Da Silva and Branco 2018; Tawalbeh *et al.* 2021). These works, however, focus on land usage rather than in specific problems related to earthworks. Despite its importance, most current practices rely on empirical knowledge or simplistic geometric criteria without fully exploiting algorithmic optimization based on topographic data.

Several efforts have been made to develop tools for optimizing PV plant layouts, but these often require specific software licenses or considerable computational resources, limiting their practical applicability during tender phases. Recent developments, such as the weighted least-square optimization method (Cicala *et al.* 2023), show promise in balancing computational efficiency with solution robustness; however, they have not been widely adopted in industry practice. Moreover, this solution is based on large planes, which are often not optimal from the point of view of earthworks savings.

The monitoring of irradiance variability across large-scale PV plants is another area with substantial knowledge gaps. Pyranometers remain the standard for measuring Plane of the Array (POA) irradiance, but economic and logistical constraints preclude widespread deployment across thousands of trackers. Traditional heuristic approaches—such as installing sensors on central rows—fail to account for spatial and energetic heterogeneity. New simulation techniques, including clear-sky irradiance modeling, digital elevation model (DEM) based hillshade analysis, and bifacial irradiance estimation, allow for a more representative selection of sensor locations. However, systematic methodologies integrating these tools into sensor placement strategies are still emerging, with notable studies like those of (Alcañiz *et al.* 2025; Pau *et al.* 2014) providing important initial frameworks. These works, however, focus in the case of rooftop facilities, leaving aside the case of bifacial panels with solar tracking, which is extended in utility scale projects.

Finally, the increased occurrence of extreme weather events linked to climate change has amplified the urgency of effective hydrological management in PV plants. Traditional soil conservation measures, particularly vegetation establishment, have been proposed as viable strategies to mitigate erosion and reduce runoff (Choi *et al.* 2020). Yet, there remains a lack of comprehensive field studies specifically tailored to PV environments, particularly those combining

hydrological performance with technical-economic feasibility evaluations.

In summary, while significant advances have been made, critical gaps persist in optimizing the interplay between topography, civil works, energy performance, and environmental sustainability in PV plants. This research seeks to address these gaps through an integrated approach grounded in geomatics, simulation, and field validation.

3. Methods

This study addresses three complementary research lines: earthworks minimization, optimal placement of irradiance sensors, and hydrological resilience strategies in photovoltaic (PV) plants located on complex terrains.

For the minimization of earthworks, a mathematical model (G-WLS) based on a Weighted Least Squares (WLS) approach was developed. The model represents the spatial configuration of single-axis tracker structures and adjusts the pile elevations to minimize earth movement while respecting constraints on maximum allowable slopes in both north-south (NS) and east-west (EW) directions, as well as continuity requirements between adjacent trackers. Design parameters such as tracker pitch, cantilever lengths, and maximum slope tolerances were explicitly incorporated. (García-Salinas *et al.* in review). In Figure 1 a depiction of the main variable can be found.

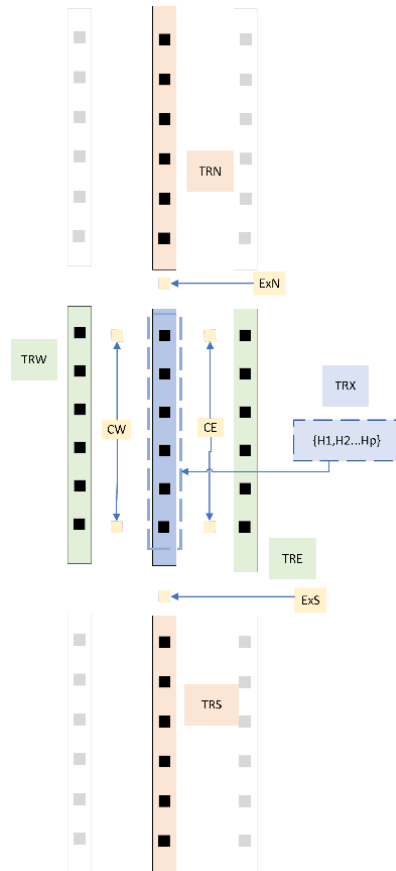


Figure 1: G-WLS model of PV plant. For each tracker TRX (blue), its neighbors in North-south direction (orange) and east-west direction (green) are considered to calculate slopes. Then external points ExN and ExS and central points CW and CE are used to pose additional constraints to ensure smooth solution.

The modelization was applied to a real plant and the earthworks were calculated and compared with a traditional solution based on planes. The mathematical minimization problem was in Eq. (1):

$$F = \sum_{x=1}^{x=n} [(\sum_{s=1}^{s=p_{TRx}} (|V_{Hs,TRx}| * FVol_s))] \quad (1)$$

where

F = earthworks quantities.

$V_{Hs,TRx}$ = volume associated with each pile of the tracker.

$FVol_s$ = Function that varies with the sign of the difference of altitude of each pile. Being -1 for computing cut and 1 for computing fill.

For the optimization of pyranometer locations, seven algorithms were implemented and compared. These included heuristic methods such as K-means clustering and maximum spatial dispersion, as well as metaheuristic optimization techniques like Simulated Annealing, and multiobjective NSGA-II. These geometrically informed algorithms were compared against Multiobjective irradiance-informed algorithm to discover if they can provide good results in optimizing sensor placement.

Input data consisted of geometric coordinates, terrain elevation, and proximity to communication boxes.

For the Multiobjective irradiance-informed algorithm, an irradiation model was developed by simulated effective irradiance using PVLlib library for irradiance in the front side of the module and PVfactors library for the rear side of the bifacial panel (Anderson *et al.* 2023). Irradiance was calculated considering the tilt of the trackers and solar tracking at hourly resolution.

Terrain-induced shading was modeled via hillshade analyses from digital elevation models (DEMs) using GRASS (GRASS 2024). Particularly, shading was modelled with a time step of 3 hours and then interpolated to obtain shading at hourly resolution as can be seen in Figure 2.

The irradiation model was first compared with pyranometers located in one of the plants of study and validated. Then, the effectiveness of each method was evaluated using metrics such as Relative mean error (RME) and Coefficient of Determination (R^2). A total of 3 projects were assessed, all of them located in the south of Spain.

4. Results

The application of the developed methodologies yielded promising results across the research lines.

For earthworks minimization study, the G-WLS algorithm achieved a significant reduction in the volume of earth movements compared to commercial civil engineering software. Specifically, the G-WLS method reduced total earthworks by approximately 30% while ensuring compliance with slope and continuity constraints, demonstrating its potential to improve both environmental outcomes and project costs. Moreover, the computation time was drastically lower, with the G-WLS model completing optimizations in approximately 4 minutes, compared to over 2 hours required by

traditional software, thus offering clear advantages during the tender phase of project development.

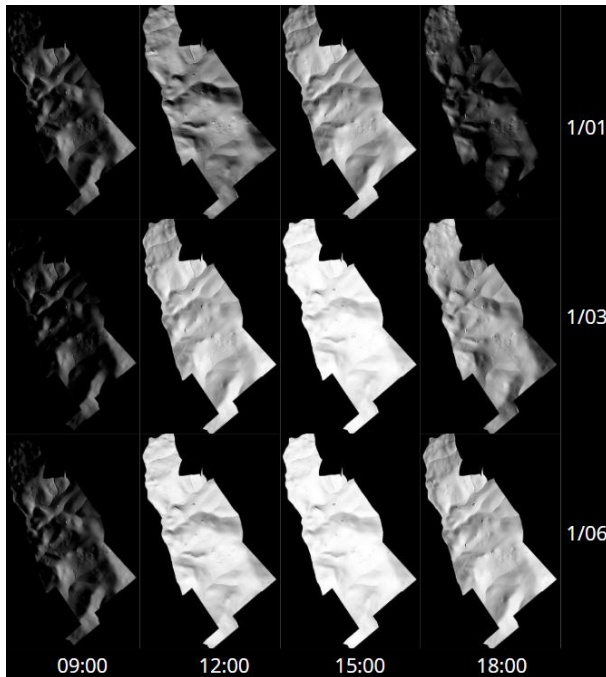


Figure 2: Shading analysis computed at a 3 hours timestep.

In the irradiance sensor placement study, the evaluation of eight different selection algorithms revealed that multiobjective optimization methods, particularly those incorporating energetic simulation variables, consistently outperformed purely geometric approaches. The irradiance-informed multiobjective method achieved the lowest Mean Absolute Error (MAE) and the highest Coefficient of Determination (R^2), indicating a superior ability to represent the temporal and spatial variability of effective irradiance across the plant. Multiobjective optimization based solely on geometrical data performed close to it. Heuristic methods such as K-Means clustering showed higher errors, particularly in sites with strong topographic variation, confirming the importance of incorporating energetic and topographic modeling into sensor deployment strategies. Figure 3 shows the comparative of RME between methods.

5. Conclusions and future works

Overall, the results demonstrate that data-driven, geomatics-integrated approaches can substantially improve the design, monitoring, and resilience of PV plants on complex terrains, offering both environmental and economic benefits.

For the case of earthworks calculation, an improvement in time of calculation and earthworks required is obtained, making it a useful tool for early stages of the

project. Moreover, the fact that this approach can be implemented without the use of costly software licenses enhances its applicability to research centers and companies. Since the model only considers trackers leaving roads, platforms and other elements, more research is required to be incorporated into the calculations for a precise estimation.

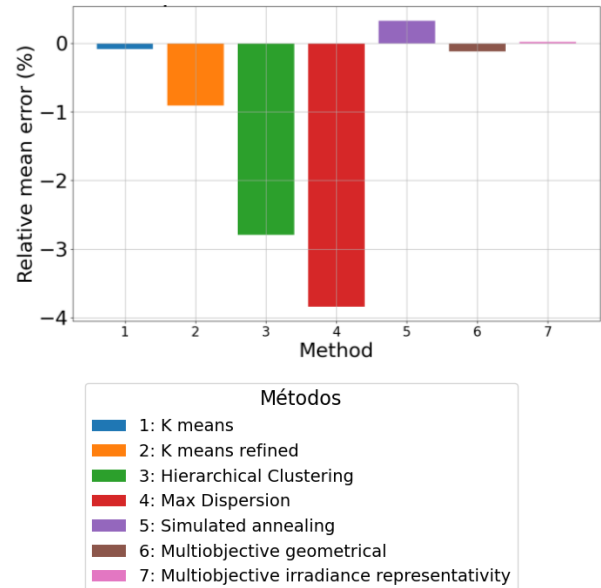


Figure 3: Representation of RME of different methods for sensor placement in project 1

Regarding sensor placement, good representativity is achieved by means of multiobjective algorithms, validating the use of geometrically informed algorithms for sensor ubication in large PV plants with bifacial modules and solar tracking. Future works will intend to improve the irradiation model to improve the capturing of rear side irradiation.

Regarding the hydrology component, preliminary planning activities have outlined the methodology for a future field study focused on vegetation-based erosion control. Although no experimental results are yet available, the study is designed to compare various vegetation management techniques under different rainfall intensities and soil types. The objective is to determine the most effective, low-maintenance strategies for enhancing hydrological stability in PV plants affected by heavy rainfall events.

Acknowledgements

This work was supported by the "Agencia Valenciana de la innovaci3n" under Grant INNTA3/23/10.

References

- AL GARNI, H.Z., and AWASTHI, A. 2018. Chapter 2 - Solar PV Power Plants Site Selection: A Review. *In Advances in Renewable Energies and Power Technologies (Vol. 1)*.
- ALCAÑIZ, A., VAN KOUWEN, M.I., ISABELLA, O., and ZIAR, H., 2025. Wide-area sky view factor analysis and Fourier-based decomposition model for optimizing irradiance sensors allocation in European solar photovoltaic farms: A software tool. *Solar Energy*, **286**, 113139. DOI: 10.1016/J.SOLENER.2024.113139

- ANDERSON, K.S., HANSEN, C.W., HOLMGREN, W.F., JENSEN, A.R., MIKOFSKI, M.A., and DRIESSE, A., 2023. pvlb python: 2023 project update. *Journal of Open Source Software*, **8**(92). DOI: 10.21105/joss.05994
- APOSPORIS H., 2023. Floods in Greece drown hundreds of photovoltaic plants. Available: <https://balkangreenenergynews.com/floods-in-greece-drown-hundreds-of-photovoltaic-plants/> [6/30, 2025].
- BÓRAWSKI, P., HOLDEN, L., and BEŁDYCKA-BÓRAWSKA, A., 2023. Perspectives of photovoltaic energy market development in the european union. *Energy*, **270**. DOI: 10.1016/j.energy.2023.126804
- CHOI, C.S., CAGLE, A.E., MACKNICK, J., BLOOM, D. E., CAPLAN, J.S., and RAVI, S., 2020. Effects of Revegetation on Soil Physical and Chemical Properties in Solar Photovoltaic Infrastructure. *Frontiers in Environmental Science*, **8**. DOI: 10.3389/fenvs.2020.00140
- CICALA, F.P., VALLEJO M. and RIONEGRO, M.T., 2022. Topography Analysis Methodology: Methodology for topography analysis, installation of PV mounting structures and earthworks calculation. RatedPower. Available: [https://go.ratedpower.com/hubfs/RatedPower-pvDesign-Topography-Analysis-Methodology%20\(1\).pdf](https://go.ratedpower.com/hubfs/RatedPower-pvDesign-Topography-Analysis-Methodology%20(1).pdf) [6/30, 2025].
- GARCIA-SALINAS, C. MARTÍN-FURONES, A.E. ANQUELA JULIAN, A.B., ALEIX MORENO, J., In review. Novel approach to earthworks estimation in utility scale PV solar plants: G-WLS algorithm. Submitted to: *Applied Geomatics*
- GRASS, 2024. GRASS - Bringing advanced geospatial technologies to the world. Available: <https://grass.osgeo.org/> [6/30, 2025].
- EL PAÍS, 2024. Las imágenes del paso de la dana en Valencia: la búsqueda de víctimas mortales | Fotos | España | EL PAÍS. Available: <https://elpais.com/espana/2024-11-02/las-imagenes-del-paso-de-la-dana-en-valencia-la-busqueda-de-victimas-mortales.html> [6/30, 2025].
- LI, C., ZHANG, W., LIU, F., LI, X., WANG, J., and LI, C., 2024a. Multi-Objective Optimization of Bifacial Photovoltaic Sunshade: Towards Better Optical, Electrical and Economical Performance. *Sustainability*, **16**(14), 5977. DOI: 10.3390/SU16145977
- LI, M., LI, Y., and DIAO, Y., 2024b. A precise and efficient K-means-ELM model to improve ultra-short-term solar irradiance forecasting. *Renewable Energy Focus*, **51**, 100645. DOI: 10.1016/J.REF.2024.100645
- PAU, M., LOCCI, N., and MUSCAS, C., 2014. A tool to define the position and the number of irradiance sensors in large PV plants. *ENERGYCON 2014 - IEEE International Energy Conference*. DOI: 10.1109/ENERGYCON.2014.6850454
- PIMENTEL DA SILVA, G.D., and BRANCO, D.A.C., 2018. Is floating photovoltaic better than conventional photovoltaic? Assessing environmental impacts. *Impact Assessment and Project Appraisal*, **36**(5), pp. 390-400.
- TAWALBEH, M., AL-OTHMAN, A., KAFIAH, F., ABDELSALAM, E., ALMOMANI, F. and ALKASRAWI, M., 2021. Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook. *Science of the total environment*, **759**, 143528.

ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE DATOS TOPOGRÁFICOS GENERADOS MEDIANTE FOTOGRAMETRÍA CON DRONES Y GNSS

ANALYSIS OF THE QUALITY OF TOPOGRAPHIC DATA GENERATED BY PHOTOGRAMMETRY WITH DRONES AND GNSS

César Leiva^{a, b, *}, Izar Sinde^a, Alexander Robayo^b

^a Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartográfica, Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, Campus Sur, A-3, Km 7, 28031 Madrid, España. , cesar.leiva.gonzalez@alumnos.upm.es; , i.sinde@upm.es

^b Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción, Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE), Av. Gral. Rumiñahui s/n, Sangolquí, Ecuador. , arobayo@espe.edu.ec

How to cite: C. Leiva, I. Sinde y A. Robayo. 2025. Análisis de la calidad de datos topográficos generados mediante fotogrametría con drones y GNSS. En libro de actas: *Quinto Congreso en Ingeniería Geomática*. Valencia, 2 – 3 de Julio de 2025. <http://dx.doi.org/10.4995/CIGeo2025.2025.19897>

Resumen:

El avance de las técnicas geoespaciales, en especial el uso de aeronaves no tripuladas o drones, equipados con diferentes sensores, ha puesto de manifiesto la utilidad de estas técnicas para la generación de productos topográficos a gran escala. En los últimos años las tecnologías geoespaciales han experimentado un desarrollo vertiginoso. Una de las que más ha crecido es la fotogrametría con dron, que permite la generación de productos topográficos a gran escala con unos rendimientos nunca antes vistos en el sector. Hoy en día, esta técnica se emplea de forma generalizada, en proyectos topográficos, sin embargo, desde el punto de vista de la exactitud posicional tanto horizontal como vertical, se presentan errores. Uno de estos errores, que generalmente pasa desapercibido, se produce a la hora de seleccionar parámetros geodésicos, como marcos de referencia y modelos geoidales o estimar el comportamiento de la ondulación geoidal en el área del proyecto. En este estudio se pretende mostrar el efecto de la incorrecta utilización de parámetros geodésicos en levantamientos fotogramétricos con UAV, para ello se realizó la evaluación de la exactitud posicional de los insumos fotogramétricos (Ortomosaico y Modelo Digital de Superficie) que se obtienen con esta técnica de medición. Esta evaluación tomará como referencia para el cálculo de la exactitud posicional puntos geodésicos y topográficos, obtenidos a partir de mediciones GNSS estáticas y RTK. Además de lo anterior, se analiza la aplicación de la nivelación GPS, todo enlazado al control básico vertical del IGM (Instituto Geográfico Militar), como método de posicionamiento altimétrico apto para la generación y validación de los productos.

Palabras clave: UAV, Drones, MDS, Ortomosaico, Exactitud posicional, Referencia vertical

Abstract:

The advancement of geospatial techniques, particularly the utilization of unmanned aerial vehicles (UAVs) or drones equipped with various sensors, has underscored the efficacy of these methods in generating large-scale topographic products. In recent years, geospatial technologies have experienced rapid development, with drone photogrammetry emerging as one of the most rapidly expanding fields. This technique facilitates the production of large-scale topographic outputs with unprecedented efficiency. Despite its widespread application in topographic projects, positional accuracy—both horizontal and vertical—remains a challenge. One often overlooked source of error is the selection of geodetic parameters, such as reference frames and geoidal models, or the estimation of geoidal undulation behavior within the project area. This study aims to evaluate the positional accuracy of photogrammetric outputs, specifically orthomosaics and digital surface models, using geodetic and topographic points obtained from static GNSS and RTK measurements as benchmarks. Additionally, the study examines the application of GPS leveling, in conjunction with the basic vertical control of the IGM (Instituto Geográfico Militar), as a viable method for altimetric positioning suitable for the generation and validation of these products.

Key words: UAV, Drones, DSM, Orthomosaic, Positional accuracy, Vertical reference

* Corresponding Author: César Leiva, cesar.leiva.gonzalez@alumnos.upm.es

1. Introducción

El uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV) está siendo una revolución a la hora de realizar levantamientos topográficos, debido sobre todo a su eficiencia y al considerable ahorro de recursos por hectárea que se pueden conseguir (Turner *et al.* 2013; Sestras *et al.* 2025). En general, el uso de UAV permite obtener información mucho más detallada que los métodos tradicionales basados en estación total o sistemas GNSS, igualando o mejorando sus precisiones (Barry and Coakley 2013; Chi *et al.* 2016; Perera and Nalani 2022; Saadatseresht *et al.* 2015).

Como se puede ver en la Figura 1, la fotogrametría con UAV tiene un compromiso claro entre exactitud y cobertura, alcanzando mejores rendimientos que métodos tradicionales como GPS o la taquimetría, y mejores precisiones que las imágenes satelitales o la fotogrametría aerotransportada.

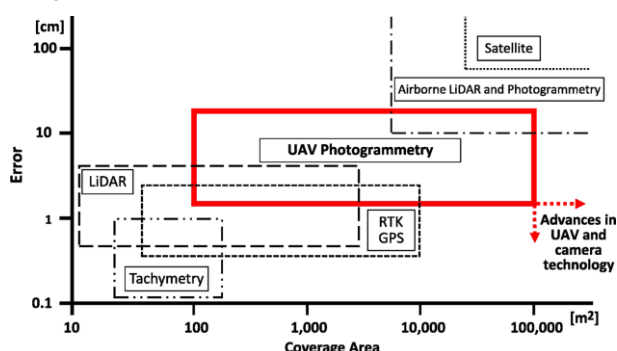


Figura 1: Potencial de los UAV en cuanto a exactitud y área de cobertura (Greenwood *et al.* 2019; Siebert and Teizer 2014).

En Deliry and Avdan (2021), se realiza una revisión exhaustiva de la exactitud de diversos trabajos topográficos encontrados en la literatura, y se ponen de manifiesto factores diferenciadores en la exactitud de los levantamientos, como el uso de diferentes cantidades y distribuciones de puntos de control (GCP) y alturas de vuelo (Reshetyuk and Martensson 2016; Agüera-Vega *et al.* 2016), el uso de UAV con sistemas RTK integrados (Gerke and Przybilla 2016; Hugenholtz *et al.* 2016; Benassi 2017; Gabriik *et al.* 2018; Hill 2019), el uso de diferentes software SfM (Structure from Motion), para procesar datos de UAV (Alidoost and Arefi 2017; Mölg and Bolch 2017) o el uso de imágenes oblicuas y combinación de bloques fotogramétricos (Ostrowski, 2016; Jiang *et al.* 2017; Duarte *et al.* 2017), pero no se han encontrado estudios en la literatura que pongan de manifiesto las influencias en exactitud del uso de parámetros geodésicos de forma correcta. Su no consideración puede llegar a generar errores sistemáticos, que podrían pasar desapercibidos y que a la larga podrían generar desajustes.

La georreferenciación precisa de los productos que se obtienen con la fotogrametría SfM, (MDS y ortoimágenes) depende en gran medida de la correcta definición del sistema de referencia geodésico, incluyendo el datum, el elipsoide, y los sistemas de coordenadas planas y verticales. Los errores sistemáticos derivados de una georreferenciación deficiente o de la omisión de parámetros geodésicos pueden comprometer la calidad y la interoperabilidad de los datos, sobre todo cuando se integran en sistemas de

información geográfica (SIG) o se comparan con otras fuentes de información espacial.

En el presente estudio se pretende evaluar como el uso estricto de parámetros geodésicos (ondulación geoidal) mejora la calidad de los productos topográficos, especialmente el MDS, obtenidos mediante fotogrametría con UAV, respecto su uso descuidado.

2. Área de estudio

El área de estudio está localizada en Ecuador, cantón Guayaquil, parroquias La Ximena y Puna, en el sector Guasmo. La morfología del terreno es plana, tiene una temperatura media de 25 grados centígrados, en donde se realizó el levantamiento topográfico de una franja de 100 m de ancho y 1.5 Km de longitud, con un área de cobertura aproximada de 75 Ha, destinado para diseños viales de un nuevo acceso a la ciudad de Guayaquil.

En la Figura 2. se muestra el área de estudio, con la respectiva franja topográfica, ortomosaico y puntos topográficos GNSS RTK.

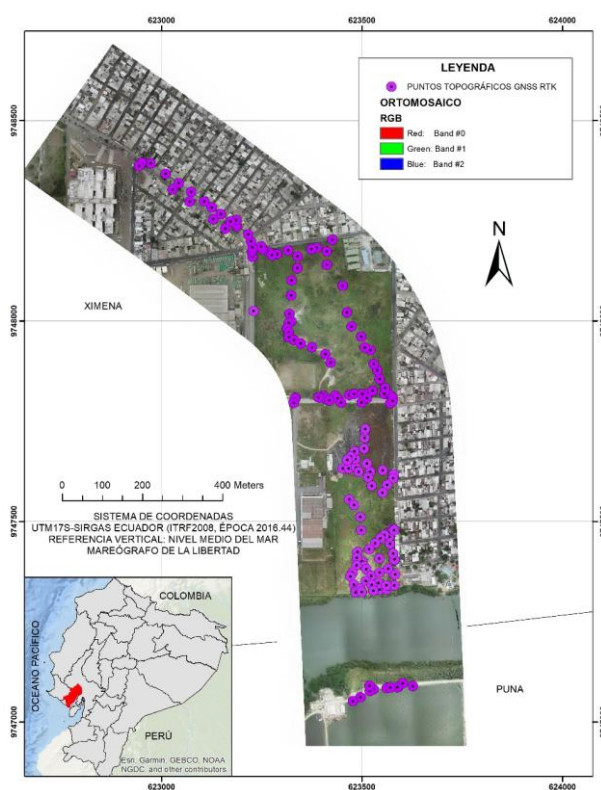


Figura 2: Área de Estudio

3. Metodología

El esquema metodológico de este estudio se muestra en la Figura 3.

3.1. Materiales y software

En el presente estudio se utilizaron equipos GNSS Trimble R8s y Trimble R4, un UAV DJI Phantom 4 RTK (P4RTK), software de procesamiento de datos GNSS Trimble Business Center v.3.9, software SfM PIX4Dmapper v.4.8.4, y software SIG, ArcGIS v.10.2.

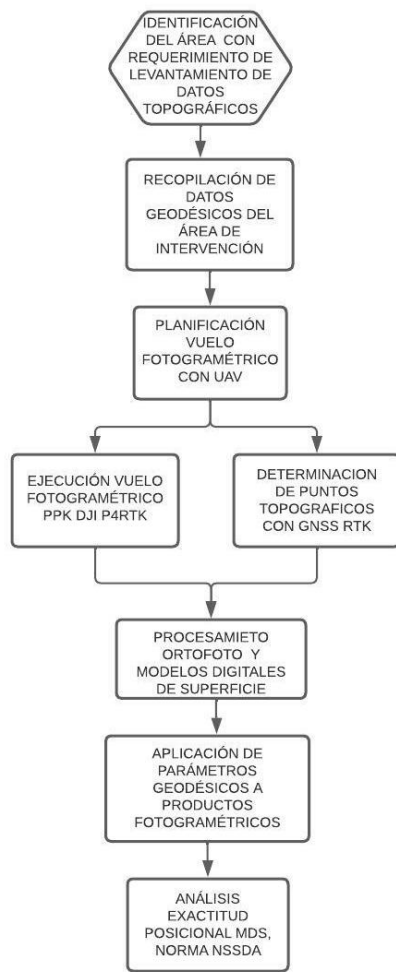


Figura 3: Esquema metodológico.

3.2. Planificación Vuelo Fotogramétrico con UAV

La planificación de vuelo fotogramétrico fue realizada en el aplicativo del UAV P4RTK considerando los parámetros de vuelo que se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros de vuelo fotogramétrico. Ground Sample Distance (GSD)

Parámetro de vuelo	Valor
Altura media de vuelo (m)	180
Solape Longitudinal (%)	80
Solape Transversal (%)	70
Número de fotos	324
Área cubierta (Ha)	157
Fecha de adquisición	Agosto, 2023
GSD (cm)	5.3

3.3. Ejecución vuelo fotogramétrico

El vuelo fue realizado en las horas centrales del día para minimizar efectos de sombra en vegetación e infraestructura, despegando de lugares despejados y cercanos a la zona central del área de estudio, para

evitar inconvenientes como pérdida de señal, o posibles accidentes.

Además, para garantizar la georreferenciación precisa de las imágenes se realizó el vuelo en modo RTK, considerando correcciones NTRIP-IGM, a partir de la estación permanente GQEC perteneciente a la geodésica del IGM, REGME (Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador), determinada en la realización ITRF (International Terrestrial Reference Frame) 2008, época de referencia 2016.44. Este método de captura, permite el cálculo preciso de la trayectoria de vuelo y las coordenadas de los centros de exposición de las imágenes, evitando el uso de GCPs (Ground Control Points) para el ajuste de los productos.

3.4. Procesamiento Ortomosaico y Modelo Digital de Superficie

El procesamiento del ortomosaico y del modelo digital de superficie fue realizado en el software PIX4D, considerando las correcciones NTRIP de la trayectoria del vuelo, sistema de coordenadas UTM17S-WGS84, referencia vertical EGM08. Es importante indicar que en el software PIX4D no se encuentra definido el marco de referencia ITRF2008, por lo que se usa el WGS84, considerando la similitud de los parámetros elipsoidales entre el GRS80 y el WGS84.

Con las imágenes obtenidas por el UAV, el software SfM comienza con la orientación automática de las fotos mediante un procedimiento de alineación de alta precisión. Posteriormente, se genera una nube de puntos dispersos y, seguidamente, una nube densa de alta calidad. Esta nube de puntos es un conjunto de puntos con coordenadas X, Y y Z en un sistema de referencia, heredado de la definición de los parámetros del proyecto (PIX4D), mencionados en el párrafo anterior y del marco de referencia utilizado en la georreferenciación precisa de las imágenes. A partir de la nube de puntos densa se genera el MDS y a partir de este, el ortomosaico.

Finalmente, se verificó de manera visual, la consistencia geométrica del ortomosaico a través de puntos de control fotointerpretables, levantados con GNSS RTK como se muestra en la Figura 4.



Figura 4: Verificación de la consistencia geométrica del ortomosaico en puntos de control fotointerpretables.

3.5. Aplicación de parámetros geodésicos a productos fotogramétricos

El principal parámetro geodésico aplicado a los productos fotogramétricos fue un offset entre la

superficie EGM08 y la referencia vertical del Ecuador (nivel medio del mar materializado por las señales de nivelación de la red de primer orden del IGM, referenciadas al mareógrafo de la Libertad, Santa Elena).

Este offset fue calculado en el punto de control vertical del IGM denominado PV68, a través de la diferencia entre la altura ortométrica EGM08 y la altura oficial IGM (altura nivelada). Es importante indicar que este punto de control se encuentra a 1.8 Km. al noroeste del centro del área de estudio.

La aplicación del offset al modelo digital de superficie se realizó en el software SIG mediante la calculadora ráster, restando el valor del offset. Seguidamente, se verificó la exactitud posicional vertical en 11 puntos de control topográfico determinados a partir del método GNSS RTK, enlazado al control horizontal y vertical del IGM, cercano a la zona de trabajo (base RTK, vértice IGM JICA y placa de nivelación PV68), fotoidentificables y a nivel del terreno (Ver Fig. 5). Tras el cálculo de los errores se comprobó la existencia de un error sistemático (todos los errores calculados fueron positivos), generado por la aplicación del primer offset, que fue calculado en un punto que no se encontraba en el centro del área de estudio, por lo que se aplicó un nuevo offset, para compensar este error. El nuevo offset se obtuvo del valor promedio de los errores en los 11 puntos de validación, según Tablas 2 y 3.

3.6. Evaluación exactitud posicional vertical MDS

El análisis de la calidad de datos topográficos generados mediante fotogrametría con dron, se basó en la evaluación del MDS ajustado, considerando que se obtendrán valores de elevación de puntos en el terreno a partir de este insumo, orientado a la obtención de la altimetría del proyecto.

En total se contó con una muestra de 142 puntos de control topográfico RTK, distribuidos en el área de intervención de este estudio. En la Figura 5 se pueden visualizar los puntos de validación.

El estadístico de exactitud posicional vertical utilizado, utilizado fue el de la norma de exactitud posicional

geoespacial del NSSDA (National Standard for Spatial Data Accuracy) a un nivel de confianza del 95 % (FGDC 1998).

4. Resultados

4.1. Procesamiento Ortomosaico y MDS

Se obtuvo un ortomosaico controlado con GSD de 5.3 cm, y se evaluó su consistencia geométrica, según lo descrito en la Sección 4.3. En la Figura 6 se presenta el ortomosaico de este estudio.

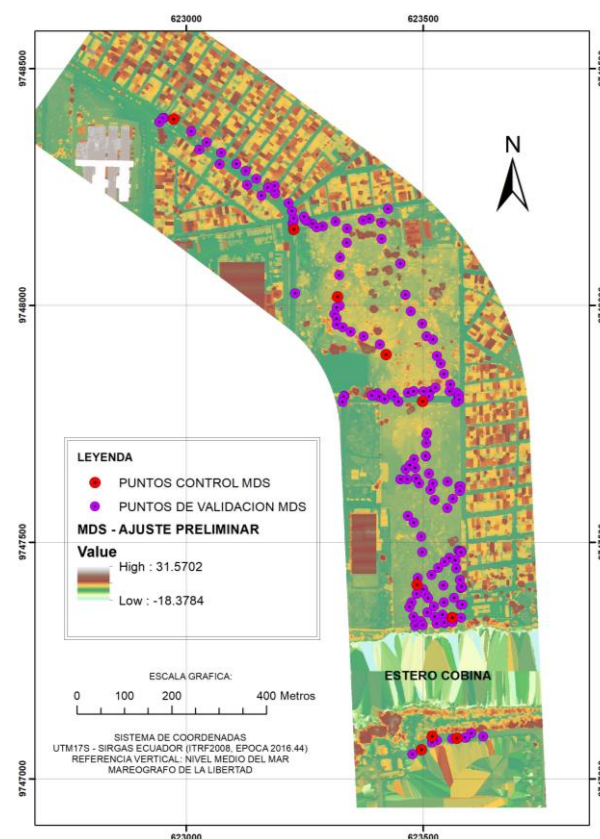


Figura 5: Ajuste preliminar de MDS a partir de puntos de control GNSS.

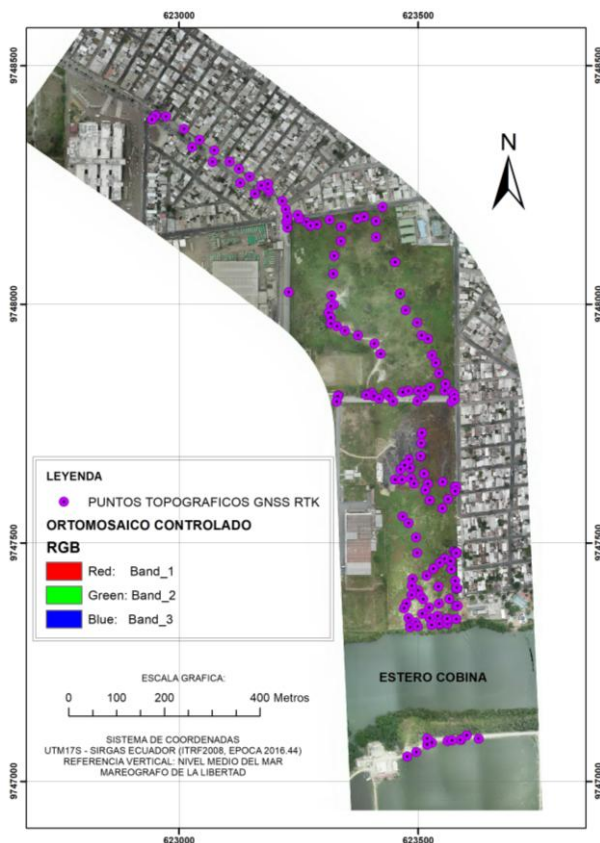
Tabla 2: Cálculo Error DSM Puntos de Control Topográfico.

Nº	Este (m)	Norte (m)	Elev_RTK	Elev_DSM	Error
1	623319.673	9748018.054	5.343	5.405	0.062
2	623422.013	9747895.616	5.600	5.659	0.059
3	623499.366	9747796.532	3.331	3.476	0.145
4	623226.980	9748160.218	3.072	3.197	0.125
5	623226.968	9748160.221	3.068	3.197	0.129
6	622973.422	9748393.000	3.124	3.206	0.082
7	623496.966	9747061.254	3.828	3.954	0.126
8	623571.304	9747085.624	3.939	3.979	0.040
9	623519.097	9747089.768	3.832	3.875	0.043
10	623487.250	9747409.476	4.462	4.693	0.231
11	623561.558	9747340.312	3.963	4.275	0.312

Tabla 3: Estadísticos Error MDS

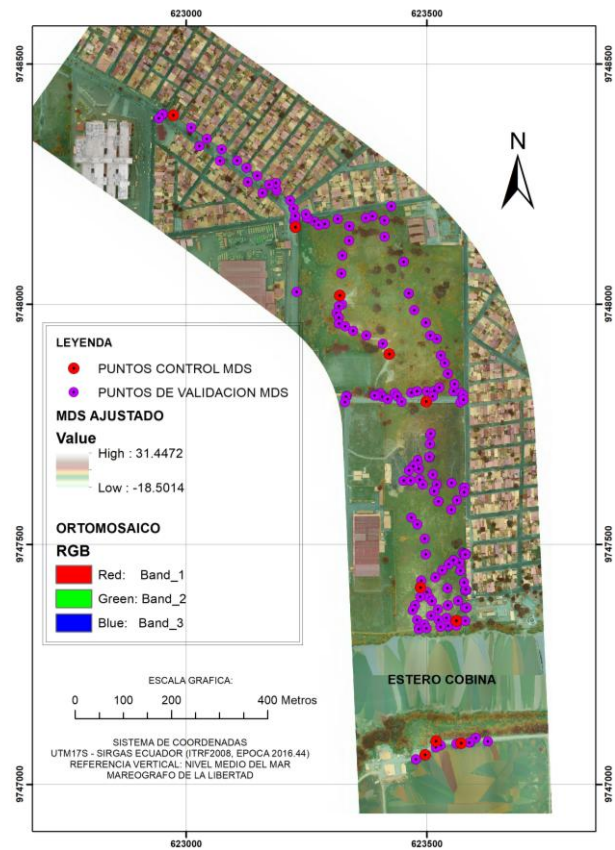
Estadístico	Valor (m)
Media	0.1231
Error típico	0.0253
Mediana	0.1250
Desviación estándar	0.0839
Varianza de la muestra	0.0070
Curtosis	1.4531
Coefficiente de asimetría	1.3100
Rango	0.2712
Mínimo	0.0404
Máximo	0.3116
Suma	1.3538
Cuenta	11
Nivel de confianza (95.0%)	0.0564

El MDS que se obtuvo del procesamiento de las imágenes, con una resolución de 25 cm, fue ajustado a la referencia vertical a partir de parámetros geodésicos y puntos topográficos RTK. El resultado se presenta en la Figura 7.

**Figura 6:** Ortomosaico controlado.

4.2. Aplicación de parámetros geodésicos a productos fotogramétricos

Como se indicó en la Sección 3.5 los principales parámetros geodésicos aplicados al MDS fueron los offsets altimétricos, basados en parámetros geodésicos.

**Figura 7:** MDS Ajustado.

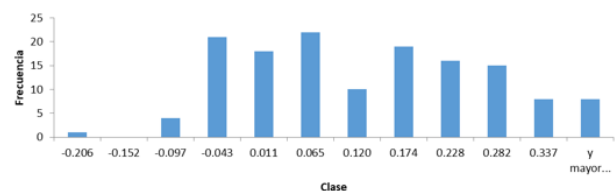
El primer offset, correspondiente a la diferencia entre el modelo EGM08 y el nivel medio del mar (Mareógrafo de La Libertad, Santa Elena, Ecuador), en el vértice IGM PV68, cercano al área de trabajo (ubicado a 1.9 Km al noroeste del centro del proyecto), fue de 91.3 cm.

El segundo offset aplicado, para eliminar el error sistemático detectado fue de 12.3 cm según la Tabla 3.

Con la aplicación de estos offsets se logró obtener un MDS ajustado a la referencia vertical oficial del IGM.

4.3. Exactitud posicional vertical

El estadístico de exactitud posicional utilizado para evaluar el MDS ajustado fue el indicado por el estándar del NSSDA, que trabaja con el RMSE a un nivel de confianza del 95 %. El tamaño de muestra fue de 142 puntos. En la Tabla 4 se presentan los estadísticos de los errores determinados y en la Figura 8 el histograma, correspondiente.

**Figura 8:** Histograma error MDS.

El indicador de exactitud posicional vertical, obtenido, según el estándar del NSSDA fue de 33.6 cm (al 95% de confianza).

Tabla 4: Estadístico Validación MDS ajustado.

Estadístico	Valor (m)
Media	0.101
Error típico	0.012
Mediana	0.084
Desviación estándar	0.139
Varianza de la muestra	0.019
Curtosis	-0.964
Coefficiente de asimetría	0.155
Rango	0.597
Mínimo	-0.206
Máximo	0.391
Suma	14.307
Cuenta	142

Como se observa en la Figura 8, el histograma, muestra valores de errores negativos y positivos, después de aplicar el segundo offset, lo que permite demostrar la eliminación de forma parcial del error sistemático,

considerando que todavía los errores positivos son más frecuentes que los negativos.

5. Conclusiones

Se realizó la evaluación de la exactitud posicional vertical de un MDS de 25 cm de GSD, de aproximadamente 75 Ha, obteniéndose un estadístico posicional vertical, según la norma del NSSDA, de 33.6 cm a un nivel de confianza del 95%. Este resultado se logró obtener luego de la aplicación de offsets altimétricos, basados en parámetros geodésicos, que generalmente, suelen pasar desapercibidos en la mayoría de trabajos topográficos con drones. La aplicación del segundo offset provocó que los errores, que en un inicio, eran solo positivos, posteriormente, pasaran a ser positivos y negativos.

Para esta evaluación de exactitud posicional se utilizó una muestra de 142 puntos topográficos RTK, enlazados al control geodésico del Instituto Geográfico Militar.

References

- AGUËRA-VEGA, F., CARVAJAL-RAMÍREZ, F., and MARTÍNEZ-CARRICONDO, P., 2016. Accuracy of digital surface models and orthophotos derived from unmanned aerial vehicle photogrammetry. *Journal of Surveying Engineering*, **143**(2), 04016025.
- ALIDOOST, F., and AREFI, H., 2017. Comparison of UAS-based photogrammetry software for 3D point cloud generation: A survey over a historical site. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, **IV-4/W4**, pp. 55–61. DOI: 10.5194/isprs-annals-IV-4-W4-55-2017.
- BARRY, P., and COAKLEY, R., 2013. Field accuracy test of RPAS photogrammetry. *ISPRS Int Arc Photogramm Remote Sens Spatial Inform Sci*. DOI: 10.5194/isprsarchives-xl-1-w2-27-2013
- BENASSI, F., DALL'ASTA, E., DIOTRI, F., FORLANI, G., MORRA DI CELLA, U., RONCELLA, R., and SANTISE, M., 2017. Testing accuracy and repeatability of UAV blocks oriented with GNSS-supported aerial triangulation. *Remote Sensing*, **9**(2), 172.
- CHI, Y.Y., LEE, Y.F., and TSAI, S.E., 2016. Study on high accuracy topographic mapping via uav-based images. *IOP Conf Ser* **44**(3):32006. DOI: 10.1088/1755-1315/44/3/032006
- TURNER, D., LUCIEER, A., and WALLACE, L., 2013. Direct georeferencing of ultrahigh-resolution UAV imagery, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **52**(5), pp. 2738–2745. DOI: 10.1109/TGRS.2013.2265295.
- DELIRY, S.I., and AVDAN, U., 2021. Accuracy of Unmanned Aerial Systems Photogrammetry and Structure from Motion in Surveying and Mapping: A Review. *J Indian Soc Remote Sens* **49**, p.p. 1997–2017. DOI: 10.1007/s12524-021-01366-x
- DUARTE, D., NEX, F., KERLE, N., and VOSSELMAN, G., 2017. Towards a more efficient detection of earthquake induced facade damages using oblique UAV imagery. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **42**, 93.
- GABRLIK, P., LA COUR-HARBO, A., KALVODOVA, P., ZALUD, L., and JANATA, P., 2018. Calibration and accuracy assessment in a direct georeferencing system for UAS photogrammetry. *International Journal of Remote Sensing*, **39**(15–16), pp. 4931–4959.
- GERKE, M., and PRZYBILLA, H.J., 2016. Accuracy analysis of photogrammetric UAV image blocks: Influence of onboard RTKGNSS and cross flight patterns. *Photogrammetrie-Fernerkundung- Geoinformation*, **1**, pp.17–30.
- GREENWOOD, W.W., LYNCH, J.P., and ZEKKOS, D., 2019. Applications of UAVs in Civil Infrastructure. *Journal of Infrastructure Systems*, **25**(2), 04019002.
- FGDC, (1998). Federal Geographic Data Committee. Geospatial Positioning Accuracy Standards, Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy — Federal Geographic Data Committee. Available: https://www.fgdc.gov/standards/projects/accuracy/part3/index_html [6/30, 2025].
- HILL, A.C., 2019. Economical drone mapping for archaeology: Comparisons of efficiency and accuracy. *Journal of Archaeological Science: Reports*, **24**, pp. 80–91.

- HUGENHOLTZ, C., BROWN, O., WALKER, J., BARCHYN, T., NESBIT, P., KUCHARCZYK, M., and MYSHAK, S., 2016. Spatial accuracy of UAV-derived orthoimagery and topography: Comparing photogrammetric models processed with direct geo-referencing and ground control points. *Geomatica*, **70**(1), pp. 21–30.
- JIANG, S., JIANG, W., HUANG, W., and YANG, L., 2017. UAV-based oblique photogrammetry for outdoor data acquisition and offsite visual inspection of transmission line. *Remote Sensing*, **9**(3), 278
- MÖLG, N., and BOLCH, T., 2017. Structure-from-motion using historical aerial images to analyse changes in glacier surface elevation. *Remote Sensing*, **9**(10), 1021.
- OSTROWSKI, W., 2016. Accuracy of measurements in oblique aerial images for urban environment. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, **XLII-2/W2**, pp. 79–85. DOI: 10.5194/isprsarchives-XLII-2-W2-79-2016.
- PERERA, G.S.N., NALANI, H.A., 2022. UAVs for complete topographic survey. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci*. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2022-441-2022
- RESHETYUK, Y., and MARTENSSON, S.G., 2016. Generation of highly accurate digital elevation models with unmanned aerial vehicles. *The Photogrammetric Record*, **31**(154), pp. 143–165.
- SAADATSERESHT, M., HASHEMPOUR, A.H., and HASANLOU, M., 2015. UAV photogrammetry: a practical solution for challenging mapping projects. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **40**, pp. 619-623.
- SESTRAS, P., BADEA, G., BADEA, A. C., SALAGEAN, T., ROȘCA, S., KADER, S., and REMONDINO, F., 2025. Land surveying with UAV photogrammetry and LiDAR for optimal building planning. *Automation in Construction*, **173**, 106092.
- SIEBERT, S., and TEIZER, J., 2014. Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an unmanned aerial vehicle (UAV) system. *Automation in Construction*, **41**, pp. 1–14.

HACIA UNA GEOINFORMACIÓN MÁS ACCESIBLE Y POTENTE: EL IMPACTO DE LOS NUEVOS ESTÁNDARES

TOWARDS MORE ACCESSIBLE AND POWERFUL GEOINFORMATION: THE IMPACT OF NEW STANDARDS

Jordi Pallàs^{a, b, *}, M. Amparo Núñez-Andrés^a, Daniel Gómez^b

^a Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Politécnica Superior de Edificación de Cataluña, Universitat Politècnica de Catalunya, Avda. Dr. Marañón 44-50, 08028, Barcelona, España.  jordi.pallas@upc.edu;  m.amparo.nunez@upc.edu

^b Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), Parc de Montjuïc, 08038 Barcelona, España.  daniel.gomez@icgc.cat

How to cite: J. Pallàs, M.A. Núñez-Andrés y D. Gómez. 2025. Hacia una geoinformación más accesible y potente: El impacto de los nuevos estándares. En libro de actas: *Quinto Congreso en Ingeniería Geomática*. Valencia, 2 – 3 de Julio de 2025. <http://dx.doi.org/10.4995/CIGeo2025.2025.19829>

Resumen:

La adopción de los nuevos estándares definidos por el Open Geospatial Consortium (OGC), en particular las OGC API, está transformando la forma en que se accede y consume la información espacial. Este artículo presenta el diseño e implementación de una arquitectura que permite integrar los estándares OGC API - Features y OGC API - Processes para ofrecer servicios interoperables y accesibles desde la web. A través de un caso de uso aplicado, se demuestra cómo estas tecnologías permiten realizar consultas y ejecutar procesos espaciales sin necesidad de software especializado, lo que amplía su alcance y facilita su uso por parte de usuarios sin formación técnica. La solución desarrollada incluye un backend personalizado que incorpora funcionalidades adicionales, lo que permite mejorar la eficiencia, potenciando el uso de la geoinformación como apoyo en la toma de decisiones de manera más ágil, transparente y eficiente, fundamentada en datos geográficos autoritativos y promueve la reutilización de datos. Los resultados evidencian el potencial del uso de estas interfaces modernas para la mejora de la accesibilidad y automatización en el manejo de los datos espaciales.

Palabras clave: OGC API, Datos espaciales, Geoprocesamiento, Interoperabilidad, Servicios web, SIG

Abstract:

The adoption of new standards defined by the Open Geospatial Consortium (OGC), particularly the OGC APIs, is transforming the way spatial information is accessed and consumed. This article presents the design and implementation of an architecture that integrates the OGC API – Features and OGC API – Processes standards to provide interoperable and web-accessible services. Through a practical use case, it demonstrates how these technologies enable spatial queries and geoprocessing operations to be executed without the need for specialized software, thereby broadening their accessibility and facilitating use by non-technical users. The developed solution includes a customized backend with additional functionalities, enhancing operational efficiency and promoting the use of geospatial data to support faster, more transparent, and more effective decision-making, grounded in authoritative geographic information. Moreover, it encourages the reuse of public data. The results highlight the potential of these modern interfaces to improve both accessibility and automation in the management of spatial data.

Key words: OGC API, Spatial data, Geoprocessing, Interoperability, Web services, GIS

1. Introducción

El uso de los datos espaciales ha experimentado un crecimiento en los últimos años. La geoinformación se ha convertido en una base importante para la toma de decisiones críticas, no solo en los aspectos más técnicos como base para proyectos de infraestructura o planificación urbana, sino como columna vertebral en el diseño de políticas públicas, prevención de riesgos naturales, agricultura, gestión de pandemias o crisis humanitarias como ejemplos varios.

Este hecho ha sido potenciado por diferentes factores. Entre ellos destaca el desarrollo de tecnologías de captura de información geoespacial y su abaratamiento. Disponer de satélites, drones, sensores LiDAR, sensores multiespectrales, acompañados por la hiperconectividad actual, donde dispositivos equipados con sistemas GNSS (global Navigation Satellite Systems) como los smartphones, permite una recolección constante y precisa de información geográfica, contribuyendo de forma directa o indirecta a la producción masiva de datos georreferenciados.

* Corresponding Author: Jordi Pallàs, jordi.pallas@upc.edu

Otro factor primordial ha sido la mejora sustancial tanto de la capacidad de almacenamiento como en la conectividad a internet marcando un punto de inflexión, posibilitando como nunca la gestión de grandes volúmenes de datos de una forma mucho más eficiente y económica.

En este contexto, la computación en la nube desempeña un papel fundamental. Por un lado, al permitir el almacenamiento en remoto de los datos, su acceso, procesamiento y análisis en tiempo real desde cualquier lugar con conexión a internet. Por otro, favoreciendo modelos flexibles y escalables según las necesidades que se requieran.

Un ejemplo claro de la necesidad de realizar procesos de forma sencilla, sin requerir amplios conocimientos técnicos por parte del usuario y del conocimiento de softwares específicos, se presenta en los entornos de emergencia. En situaciones de crisis, como desastres naturales o accidentes a gran escala, contar con información geoespacial actualizada, precisa y autoritativa es crucial para una respuesta rápida y eficaz por parte de los cuerpos de protección.

Para ofrecer una mejor interoperabilidad en el uso y gestión de la geoinformación, el OGC ha desarrollado una nueva generación de estándares, las OGC API, como evolución a los clásicos servicios web OGC (WMS, WFS, WCS). Estos estándares adoptan un enfoque más moderno, alineado con las nuevas necesidades y tecnologías actuales, basado en principios REST y el uso de formatos como JSON, más simples, ligeros y compatibles con gran parte de los desarrollos web.

Entre estos nuevos estándares destacan la OGC API - Features, orientada a la consulta y acceso a datos vectoriales y la OGC API - Processes, que permite ejecutar procesos geoespaciales de forma remota a través de peticiones estandarizadas. Estas APIs están diseñadas para integrarse fácilmente en entornos web y en aplicaciones modernas, facilitando el acceso y uso de la información geográfica por parte de desarrolladores, instituciones y usuarios finales.

En este artículo se presentan los avances implementados que han permitido facilitar el acceso y uso de la información geográfica, mostrando casos concretos del uso que se puede generar por usuarios no expertos para interactuar con la geoinformación en diferentes contextos, permitiendo optimizar la gestión de datos y el desarrollo de aplicaciones, poniendo en el centro las necesidades del usuario, facilitando la toma de decisiones basadas en información espacial de forma rápida, precisa y eficiente, mediante interfaces intuitivas.

2. Estado del arte

En las últimas décadas, el entorno que envuelve a la geoinformación ha sufrido una gran transformación como ha ocurrido en muchas otras áreas del conocimiento, impulsadas por el avance tecnológico y el paso del soporte físico a la digitalización. Este hecho se ha visto impulsado por iniciativas que promueven el acceso abierto a los datos, la interoperabilidad y la estandarización. Para poder afrontar estos desafíos diversas instituciones y organismos han publicado nuevos marcos normativos y estándares que permitan

una integración factible entre los diferentes actores que intervienen tanto en la producción, distribución y uso de la geoinformación.

A nivel institucional, la Unión Europea ha sido clave para poder materializar una infraestructura de datos espaciales común para los estados miembros. La directiva INSPIRE (PE, Consejo de la UE 2007), estableció en 2007 un marco legal común, con el objetivo de armonizar y compartir conjuntos de datos espaciales en Europa, estableciendo 34 conjuntos temáticos diferentes, definiendo para cada uno de ellos estructuras comunes, formatos y servicios de distribución disponibles a través de internet y la importancia de la catalogación mediante metadatos.

A principios de 2023, entró en vigor el reglamento europeo sobre conjuntos de datos de alto valor (Comisión Europea, 2022), basado en la directiva sobre datos abiertos y reutilización de la información en el sector público (PE, Consejo de la UE 2019), con el fin de asegurar que ciertos datos públicos, entre los que se encuentran los datos geoespaciales, sean de acceso fácil y gratuito, en formatos legible por máquinas y disponibles mediante API. Este reglamento refuerza la necesidad de adoptar estándares comunes definidos por la OGC para garantizar una interoperabilidad eficiente a la información.

La adopción de estándares abiertos ha sido un factor clave para la evolución en la gestión de la geoinformación, gracias a la existencia de especificaciones técnicas comunes, impulsadas por el OGC, la reutilización de datos y la automatización de procesos son posibles.

La aparición de los primeros estándares de servicios web a finales de los años 90 y principios de los 2000 (OGC 2025), coincidiendo en el momento de la expansión de internet, con la finalidad de facilitar la visualización, el acceso y la manipulación de los datos a través de la web. Durante años y aún en la actualidad, los servicios web como WMS (Web Map Service), WFS (Web Feature Service), WCS (Web Coverage Service) y WPS (Web Processing Service) entre los más destacados, han desempeñado un papel clave en el intercambio de datos espaciales. Estos servicios, basados en arquitectura SOAP y XML, presentan limitaciones en lo que se refiere a flexibilidad e integración con las tecnologías de la web moderna. A finales 2019 se aprobó el primer estándar de la familia OGC API (OGC API 2019; OGC 2019), el OGC API - Features, que permite el acceso y consulta de datos vectoriales a través de *endpoints* RESTful, en formatos modernos, extensamente utilizados por los desarrolladores como son el JSON y HTML. Por su parte, el OGC API - Processes se aprobó en 2021 (OGC API 2021), como evolución al servicio web WPS, permite la ejecución de procesos geoespaciales directamente desde el servidor mediante peticiones POST HTTP estandarizadas. Esto permite a los usuarios realizar análisis espaciales más o menos complejos, como intersecciones o zonas de influencia sin necesidad de software específico ni conocimientos avanzados en geoprocésamiento. Al delegar el procesamiento al servidor, permite incrementar la eficiencia y reducir la barrera técnica de acceso, permitiendo tanto a desarrolladores como a usuarios sin

experiencia ejecutar operaciones desde interfaces web sencillas.

Esta nueva familia de estándares está diseñada de forma modular "building blocks", facilitando una implementación progresiva de nuevas funcionalidades ensamblando los componentes que sean necesarios.

En relación con esta temática, diversos trabajos recientes destacan la importancia de los nuevos estándares OGC API en el ámbito de la gestión de información espacial. En concreto del estándar OGC API Processes, el estudio Lawler *et al.* (2024) evalúa su aplicación para la gestión de grandes volúmenes de datos destinados a la modelización de inundaciones, actuando como capa de interoperabilidad en un sistema basado en la nube. De manera similar, (Mohr *et al.* 2025), destaca el estándar OGC API Processes como uno de los estándares más adecuados para la implementación de una plataforma de geoprocasamiento federado en entornos *cloud*, consolidando su relevancia en la automatización y distribución de procesos geoespaciales.

En esta misma línea, Duque *et al.* (2024) presenta una plataforma orientada a la gestión y publicación datos de monitoreo ambiental, basada en la integración de varios de los estándares, OGC API Features, Processes y Environmental Data Retrieval (EDR). Esta propuesta, aplicada a un caso de uso real, en la gestión de más de 55 millones de observaciones, demuestra cómo la combinación de estos estándares permite mejorar la personalización de los procesos, realizar consultas más flexibles y ofrecer resultados más ajustados a las necesidades específicas de los usuarios.

3. Metodología y arquitectura

En esta sección se describen los componentes tecnológicos utilizados en la implementación y desarrollo de una plataforma modular centrada en facilitar el acceso, consulta y procesamiento de datos geoespaciales, utilizando tecnologías modernas para un manejo eficiente de la información.

En una primera fase de documentación, se planteó utilizar software de código abierto ya existente que permitiese la implementación de los nuevos estándares OGC API. Como primer paso para evaluar las capacidades de estos estándares, y considerando tanto la familiaridad con la plataforma GeoServer como las referencias en artículos sobre comparativas de rendimiento entre distintas opciones, como también PyGeoAPI (Santana and Clodoveu 2023), se optó por utilizar la extensión disponible en Geoserver para la distribución de diferentes conjuntos de datos a través de OGC API - Features, para publicar en octubre de 2022, el primer servicio OGC API Features.

Una vez evaluado el rendimiento y las capacidades de las soluciones iniciales, se decidió avanzar en el desarrollo de una implementación personalizada (Fig. 1), que permitiera ofrecer una respuesta más adecuada a las necesidades específicas, permitiendo gestionar los datos de diferentes orígenes más adecuadamente. La API está desarrollada con FastAPI y containerizada con Docker, siendo orquestada mediante Kubernetes, MongoDB como base de datos para el almacenamiento de los conjuntos de datos. Incluye

distintos módulos basados en los estándares de la OGC AP y componentes adicionales.

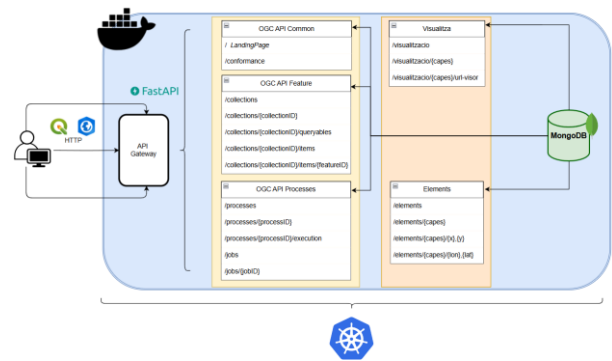


Figura 1: Arquitectura general de la solución implementada.

3.1. Diseño Tecnológico del Sistema

Se optó por utilizar FastAPI (FastAPI 2018) como framework principal para la implementación del backend. Esta elección no solo permite la integración de los requisitos definidos por los estándares OGC API, sino que también ha permitido el desarrollo de funcionalidades adicionales destinadas a optimizar la distribución, consulta y procesamiento de la geoinformación.

FastAPI es un framework orientado al desarrollo de APIs utilizando el lenguaje de programación Python. Basado en los principios del estándar OpenAPI (Swagger 2025), y en el uso del esquema JSON como estructura principal para la definición de los datos, permite construir servicios RESTful. Una de sus capacidades más destacadas es la generación automática de la documentación interactiva, a través de interfaces ampliamente utilizadas por la comunidad de desarrolladores como son Swagger UI y Redoc, haciendo posible una implementación más ágil, simple y rápida de los diferentes servicios expuestos por la API.

La arquitectura implementada está containerizada mediante Docker, lo que permite encapsular las dependencias, configuraciones y entorno de ejecución, garantizando una coherencia entre los diferentes entornos de desarrollo, test y producción, facilitando un despliegue automatizado y continuo.

Para la gestión de los contenedores, se emplea Kubernetes como plataforma de orquestación, permitiendo desplegar, escalar y supervisar el estado de los diferentes servicios, ofreciendo más resiliencia ante fallos, equilibrando la carga y gestión de recursos, adaptándose de manera automática según las necesidades.

Un elemento clave en la distribución de datos geográficos es la elección de la base de datos o repositorio donde se almacenan los datos. Existen diversas opciones para gestionar información espacial, en este caso se ha optado por la utilización de MongoDB, una base de datos no relacional orientada a documentos.

MongoDB almacena la información en formato BSON (JSON binario), lo que facilita la representación de los datos mediante la API. Además, según diversos estudios (Bartoszewski *et al.* 2019; Jung *et al.* 2015;

Treviño-Villalobos *et al.* 2020), permite obtener mejores rendimientos en comparación con opciones más habituales como Postgres + PostGIS, por su alta eficiencia a la hora de indexar los elementos. Otra de las características por la que resulta una muy buena opción, es la capacidad de poder realizar consultas espaciales básicas, tales como la intersección de geometrías, lo que permite realizar operaciones espaciales sencillas de manera nativa en la BBDD sin necesidad de extensiones adicionales.

3.2. Componentes y Funcionalidades Principales

Los diferentes componentes se han agrupado según la finalidad de su funcionalidad (Figs. 2 y 3), en correspondencia con la implementación de los módulos definidos por los estándares de la OGC API y funcionalidades adicionales requeridas para diferentes casos de uso. En la Figura 2 se muestran los diferentes endpoints disponibles organizados por estándar y funcionalidad. La interfaz permite probar y explorar los servicios de forma interactiva.

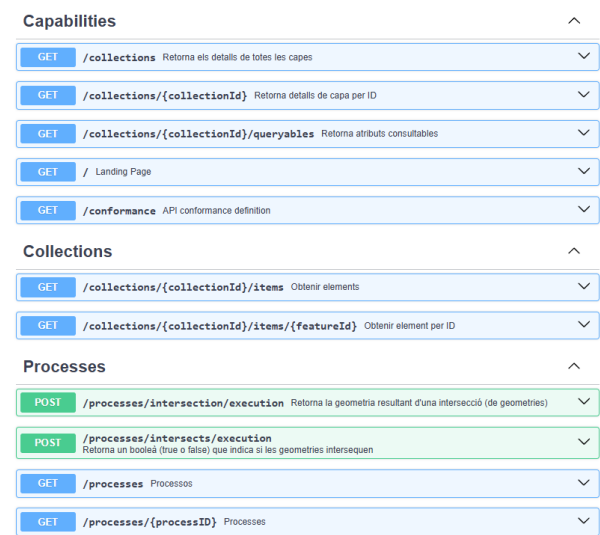


Figura 2: Interfaz de documentación de la API desarrollada.

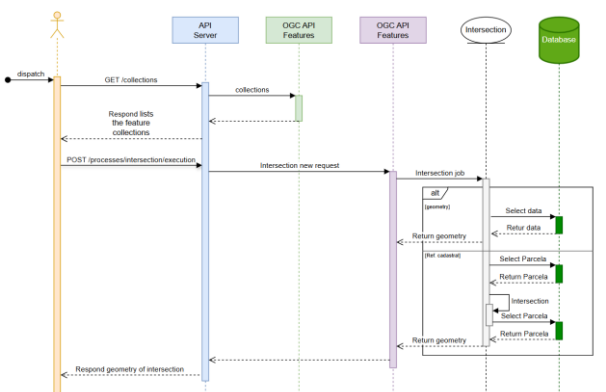


Figura 3: Diagrama de secuencia de un conjunto de peticiones a la API y sus diferentes elementos funcionales.

3.2.1. OGC API Common

Como elemento común para el desarrollo de la OGC API, se encuentra el componente OGC API *Common*

(OGC API 2023b), que define un conjunto de elementos comunes y reutilizables para las demás OGC API, proporcionando la estructura sobre la que implementar los demás componentes de la OGC API, permitiendo una integridad completa y coherencia entre los módulos. En la Tabla 1 se describen los diferentes *endpoints* correspondiente a este módulo.

Tabla 1: Descripción de los endpoints OGC API - Common

HTTP method	Path	Description
GET	/	Página principal de la API, proporciona los enlaces necesarios para acceder a los diferentes recursos implementados.
GET	/conformance	Lista de todas las clases de conformidad que cumple el servicio, según el estándar.

3.2.2. OGC API Features

Este módulo permite acceder a colecciones de datos espaciales vectoriales (puntos, líneas o polígonos), ofreciendo funcionalidades para realizar diferentes consultas y aplicar filtros tanto por atributos como por criterios espaciales, como el uso de *bounding box* (BBOX). Las geometrías se devuelven en formato GeoJSON, facilitando su integración en aplicaciones web y Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Una ventaja importante a destacar es la paginación de resultados, que previene la sobrecarga del servidor al dividir la respuesta en múltiples solicitudes, en función del límite máximo de elementos especificado por el cliente en cada solicitud.

Los diferentes *endpoints* asociados a este componente se describen en la **¡Error! No se encuentra el origen d e la referencia..**

Tabla 2: Descripción de los endpoints OGC API - Features

HTTP method	Path	Description
GET	/collections	Colecciones de objetos geográficos disponible.
GET	/collections/{collectionID}	Descripción completa de una colección específica.
GET	/collections/{collectionID}/queryables	Atributos consultables (queryables) de una colección.
GET	/collections/{collectionID}/items	Devuelve los elementos geográficos (features) contenidos en una colección determinada.
GET	/collections/{collectionID}/items/{featureID}	Devuelve una única entidad geográfica (feature).

3.2.2.1. Validación de la implementación

Una vez finalizada la implementación del módulo OGC API Features, se procedió a su validación conforme a los requisitos establecidos por el estándar. Para ello, se utilizó la herramienta de pruebas automatizadas proporcionada por la OGC, en particular la plataforma

de TEAM Engine (OGC API 2023a), que permite verificar la conformidad tanto de la parte 1 como la parte 2 del estándar.

Dado que se trata de una implementación personalizada, sin dependencias directas de soluciones preexistentes de terceros, la fase de validación requirió múltiples iteraciones de prueba y ajuste, identificando y corrigiendo algunas inconsistencias que permitieron superar todos los test de conformidad (Fig. 4).

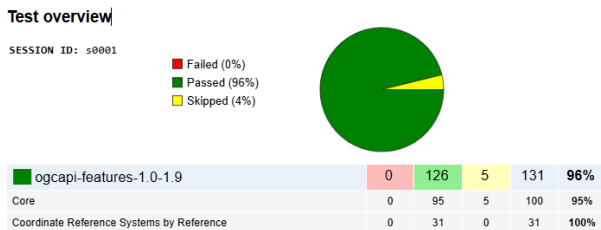


Figura 4: Resultados del proceso de validación de conformidad del servicio OGC API – Features.

Además de las pruebas automatizadas, también se realizaron pruebas manuales de integración con software cliente, tanto libre como propietario, de uso común en el ámbito de la geoinformación, como QGIS y ArcGIS Pro, con el objetivo de asegurar una interoperabilidad real en situaciones de uso práctico y garantizar una experiencia fluida para los usuarios.

Como resultado de esta validación, se pudo confirmar que la implementación cumple con los criterios definidos por la OGC, lo que garantiza que otros sistemas conformes puedan consumir los servicios sin requerir desarrollos adicionales de adaptación.

3.2.3. OGC API Processes

El componente correspondiente a los requisitos de la OGC API *Processes*, permite la ejecución de procesos de geoprosesamiento directamente en el servidor. Al igual que la implementación de la API, el desarrollo de los diferentes procesos disponibles se ha realizado utilizando el lenguaje de programación Python.

Se han implementado dos funciones de procesamiento espacial que se ejecutan de forma síncrona:

- **Intersection:** Devuelve las geometrías de una colección determinada que intersecan con la geometría proporcionada por el usuario en la solicitud. Esta geometría de consulta puede ser un punto (mediante coordenadas), una línea o polígono en formato GeoJSON, o bien una referencia catastral de una parcela.
- **Intersect:** Devuelve un valor booleano indicando de si existe al menos una geometría de la colección seleccionada que interseca con la geometría o referencia catastral especificada.

En ambas funciones se ha incorporado la opción de aplicar un *buffer* (área de influencia) a la geometría de entrada, permitiendo ampliar el área de intersección y trabajar con una zona de influencia alrededor del objeto consultado. Esta funcionalidad es especialmente útil en contextos donde se requieren distancias de proximidad entre elementos, áreas de riesgo, entre otros.

La ejecución de los procesos se realiza mediante una petición HTTP de tipo POST, lo puede representar una dificultad para usuarios menos familiarizados con este tipo de operaciones.

Los diferentes *endpoints* implementados para este componente se describen en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 3: Descripción de los *endpoints* OGC API – Processes.

HTTP method	Path	Description
GET	/processes	Lista de todos los procesos disponibles.
GET	/processes/{processID}	Descripción completa de un proceso determinado.
GET	/processes/{processID}/execution	Inicia la ejecución de un proceso determinado.
GET	/jobs	Lista todos los trabajos que han sido ejecutados.
GET	/jobs/{jobID}	Información detallada sobre un trabajo específico.

3.2.4. Funciones adicionales

Una vez implementados los estándares de la OGC API como base al desarrollo, se han incorporado dos bloques adicionales de funcionalidades personalizadas, diseñados para cubrir necesidades específicas no contempladas directamente en el estándar. Estas extensiones responden a casos de uso detectados y orientados a mejorar la experiencia del usuario, facilitar la integración con datos externos y simplificar tareas habituales para usuarios finales.

En la Tabla 4 se detallan las funcionalidades implementadas para permitir la visualización de distintas capas directamente sobre el mapa, facilitando su carga mediante URL generada de forma automática. Están funciones están orientadas a mejorar la interacción del usuario con los datos espaciales, proporcionando un acceso rápido y personalizado.

Tabla 4: Descripción de los *endpoints* para funciones para la visualización de capas.

HTTP method	Path	Description
GET	/visualitzacio	Lista de capas disponibles para visualizar.
GET	/visualitzacio/{capes}	Información de las capas determinadas por ID.
GET	/visualitzacio/{capes}/url-visor	Devuelve una url del visor con las capas cargadas.

En la Tabla 5 se recogen las funcionalidades adicionales desarrolladas para la consulta a partir de una ubicación concreta, el sistema devuelve todos los elementos presentes en ese punto y sus atributos asociados de los diferentes conjuntos de información.

3.3. Origen de los datos

Con el objetivo de asegurar el acceso a datos espaciales oficiales, que aseguren su calidad y fiabilidad

a través de la API, los distintos conjuntos de información disponibles se encuentran descritos en el Plan Cartográfico de Catalunya (PCC) (Generalitat de Catalunya 2010; 2022). Este instrumento actúa como marco de referencia para la producción, actualización y difusión de la cartografía oficial de Cataluña, de obligado cumplimiento por las administraciones públicas.

Tabla 5: Descripción de los *endpoints* para la consulta de elementos espaciales y obtención de información por coordenadas.

<i>HTTP method</i>	<i>Path</i>	<i>Description</i>
GET	/elements	Lista de capas o servicios disponibles para consultar.
GET	/elements/{capes}	Información de las capas determinadas por ID.
GET	/elements/{capes}/{x},{y}	Devuelve la geometría y atributos de las capas, en las coordenadas proyectadas introducidas.
GET	/elements/{capes}/{lon},{lat}	Devuelve la geometría y atributos de las capas, en las coordenadas geográficas introducidas.

El PCC promueve la interoperabilidad de los datos y evita duplicidades entre administraciones, asegurando la coherencia de los datos geoespaciales, fundamental para garantizar una cartografía actualizada, precisa y accesible. Además, fomenta el desarrollo tecnológico en el ámbito geoespacial, adoptando estándares abiertos y buenas prácticas en la gestión de la información.

Gracias a este enfoque coordinado, el plan proporciona una base sólida sobre la que construir servicios interoperables, que den servicio para la planificación territorial, la gestión de infraestructuras y la toma de decisiones basadas en datos.

4. Casos de uso

Para mostrar los beneficios prácticos de los nuevos estándares de la OGC API, se propone un caso de uso centrado en mejorar el acceso a la información del territorio mediante herramientas de consulta y análisis espacial accesibles desde la web.

Uno de los principales obstáculos al trabajar con datos geográficos es la necesidad de utilizar software especializado, lo que limita el acceso a esta información por parte de usuarios potenciales sin formación técnica.

En numerosos procedimientos administrativos, conocer con precisión la ubicación del elemento en cuestión es fundamental, ya que permite identificar posibles afectaciones normativas que puedan condicionar los requisitos aplicables.

La información geográfica desempeña un papel clave en procedimientos administrativos de temática diversa. Algunos ejemplos incluyen la matriculación de estudiantes en centros educativos cercanos al domicilio, la autorización de actividades en la industria o la solicitud de becas y ayudas sociales. En todos estos casos, la localización del solicitante o del elemento afectado resulta esencial para validar los requisitos y

determinar las condiciones específicas que pueden aplicarse según la normativa vigente.

La propuesta presentada en este artículo plantea el uso de la API desarrollada como herramienta que facilite tanto a la ciudadanía como a la propia administración el acceso inmediato y preciso a la información espacial necesaria. Una solución basada en una interfaz web integrada con las funcionalidades de la API RESTful, que permite realizar consultas espaciales mediante formularios interactivos y visuales.

El usuario puede introducir una ubicación o seleccionar una referencia catastral de una parcela, y el sistema devuelve los elementos de las capas afectadas y una representación sobre el mapa, haciendo posible identificar de forma sencilla qué condicionantes afectan a cada trámite, lo que permite una gestión más ágil, transparente y eficiente.

5. Discusión y conclusiones

La implementación de los nuevos estándares definidos por la OGC, han permitido facilitar la interoperabilidad, accesibilidad y reutilización de la información espacial a través de la web, empleando interfaces modernas e intuitivas.

La arquitectura empleada, basada en la contenerización y orquestación, permite una integración flexible y escalable de los servicios geoespaciales, favoreciendo una gestión más eficiente, automatizada y adaptable a diferentes contextos.

La elección de una implementación personalizada ha permitido centrar el desarrollo en la experiencia del usuario, ajustándose mejor a sus necesidades y optimizando funcionalidades. Los resultados obtenidos demuestran que es posible ofrecer soluciones accesibles a usuarios no especializados, capaces de consultar, analizar y procesar datos espaciales sin necesidad de utilizar software GIS tradicional. Esta democratización del acceso a la geoinformación no solo reduce barreras técnicas, sino que favorece una toma de decisiones más ágil, precisa, eficiente y homogénea entre los diferentes agentes implicados, fundamentada en datos autoritativos y oficiales, como se ejemplifica en el caso de uso desarrollado.

Este trabajo establece la base para el desarrollo de nuevas funcionalidades adaptadas a un entorno tecnológico en constante transformación. Uno de los principales objetivos de trabajos futuros destaca la ampliación de procesos geoespaciales disponibles, evaluando operaciones más complejas, la necesidad de ejecución de procesos asíncronos en remoto y la combinación de diferentes procesos encadenados, que permitan la automatización de flujos de trabajo completos y aumentar la capacidad de respuesta y rendimiento del sistema ante necesidades diversas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el programa de Doctorat Industrial (exp. 2024 DI 00026) de la Agència de Gestió d'Ajuts Universitaris i de Recerca (AGAUR) de la Generalitat de Catalunya. Se enmarca en una colaboración entre el Institut Cartogràfic i Geològic de

Catalunya (ICGC) y la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).

como por el acceso a los conjuntos de datos necesarios para el desarrollo de este trabajo.

Agradecer en especial al ICGC el soporte prestado, tanto por la infraestructura tecnológica y de sistemas,

References

- BARTOSZEWSKI, D., PIORKOWSKI, A. and LUPA, M., 2019. The Comparison of Processing Efficiency of Spatial Data for PostGIS and MongoDB Databases, in: Kozielski, S., Mrozek, D., Kasprowski, P., Małysiak-Mrozek, B., Kostrzewa, D. (Eds.), *Beyond Databases, Architectures and Structures. Paving the Road to Smart Data Processing and Analysis*. Springer International Publishing, Cham, pp. 291–302. DOI: 10.1007/978-3-030-19093-4_22
- COMISIÓN EUROPEA, 2022. Reglamento de Ejecución (UE) 2023/138 de la Comisión de 21 de diciembre de 2022 por el que se establecen una lista de conjuntos de datos específicos de alto valor y modalidades de publicación y reutilización (Texto pertinente a efectos del EEE), OJ L. Available: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2023-80077> [3/5, 2025].
- DUQUE, J.P., PUGLIESE, A. de J. and BROVELLI, M.A., 2024. A standardised approach for serving environmental monitoring data compliant with OGC APIs. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **XLVIII-4-W12-2024**, pp. 51–58. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W12-2024-51-2024
- FASTAPI, 2018. FastAPI framework, high performance, easy to learn, fast to code, ready for production. Available: <https://fastapi.tiangolo.com> [3/5, 2025].
- GENERALITAT DE CATALUNYA, 2010. DECRET 62/2010, de 18 de maig, pel qual s'aprova el Pla cartogràfic de Catalunya. Available: <https://portaljuridic.gencat.cat/ca/document-del-pjur/?documentId=542412> [3/5, 2025].
- GENERALITAT DE CATALUNYA, 2022. DECRET 53/2022, de 22 de març, pel qual s'aprova la revisió del Pla cartogràfic de Catalunya. Available: <https://portaljuridic.gencat.cat/ca/document-del-pjur/?documentId=923653> [3/5, 2025].
- JUNG, M.-G., YOUN, S.-A., BAE, J. and CHOI, Y.L., 2015. A Study on Data Input and Output Performance Comparison of MongoDB and PostgreSQL in the Big Data Environment, in: 2015 8th International Conference on Database Theory and Application (DTA), pp. 14–17. DOI: <https://doi.org/10.1109/DTA.2015.14>
- LAWLER, S., ZHANG, C., SIDDIQUI, A.R., LINDEMER, C., ROSA, D., LEHMAN, W., FERREIRA, C. and Di, L., 2024. Leveraging OGC API for cloud-based flood modeling campaigns. *Environ. Model. Softw.* **171**, 105855. DOI: 10.1016/j.envsoft.2023.105855
- MOHR, M., PEBESMA, E., DRIES, J., LIPPENS, S., JANSSEN, B., THIEX, D., MILCINSKI, G., SCHUMACHER, B., BRIESE, C., CLAUS, M., JACOB, A., SACRAMENTO, P. and GRIFFITHS, P., 2025. Federated and reusable processing of Earth observation data. *Sci. Data* **12**, 194. DOI: 10.1038/s41597-025-04513-y
- OGC, 2019. First of new OGC APIs approved as an OGC standard: OGC API - Features - Part 1: Core - OGC. Open Geospatial Consortium. Available: <https://www.ogc.org/announcement/first-of-new-ogc-apis-approved-as-an-ogc-standard-ogc-api-features-part-1-core/> [4/17, 2025].
- OGC, 2025. Web Map Service (WMS) Standard | OGC Publications. Open Geospatial Consortium. Available: <https://www.ogc.org/publications/standard/wms/> [4/17, 2025].
- OGC API, 2019. OGC API – Features. Available: <https://ogcapi.ogc.org/features/> [4/17, 2025].
- OGC API, 2021. OGC API - Processes - Part 1. Available: <http://www.opengis.net/doc/IS/ogcapi-processes-1/1.0> [4/17, 2025].
- OGC API, 2023a. OGC API-Features 1.0 Conformance Test Suite. Available: <https://cite.ogc.org/teamengine/about/ogcapi-features-1.0/1.0/site/> [3/5, 2025].
- OGC API, 2023b. OGC API - Common - Part 1: Core. Available: <https://docs.ogc.org/is/19-072/19-072.html> [3/5, 2025].
- PE, Consejo de la UE, 2007. Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council of 14 March 2007 establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE), OJ L 108. Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2007/2/oj/eng> [3/5, 2025].
- PE, Consejo de la UE, 2019. Directive (EU) 2019/1024 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2019 on open data and the re-use of public sector information (recast), OJ L172. Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/1024/oj/eng> [3/5, 2025].
- SANTANA, I.L. and CLODOVEU A., C.A., 2023. Comparative Performance Evaluation Of OGC API And OGC Web Feature Service, in: Feitosa, F.F., Vinhas, L. (Eds.), XXIV Brazilian Symposium on Geoinformatics - GEOINFO 2023, São José Dos Campos, SP, Brazil, December 4-6, 2023. MCTI/INPE, pp. 134–143.
- SWAGGER, 2025. OpenAPI Specification - Version 3.1.0 | Swagger. Available: <https://swagger.io/specification/> [11/25, 2024].

TREVIÑO-VILLALOBOS, M., VÍQUEZ-ACUÑA, L. and QUIRÓS-OVIEDO, R., 2020. Comparison of the Response Times of MongoDB and PostgreSQL According to Type of Query in Geographical Databases. *Comput. Sist.* **24**. DOI: 10.13053/cys-24-4-3292

INTEGRACIÓN DE GEOMÁTICA PARTICIPATIVA PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL AGUA EN SISTEMAS DE RIEGO COMUNITARIOS: CASO DE ESTUDIO CANAL DE RIEGO CAYAMBE-PEDRO MONCAYO (ECUADOR)

INTEGRATION OF PARTICIPATORY GEOMATICS FOR SUSTAINABLE WATER MANAGEMENT IN COMMUNITY IRRIGATION SYSTEMS: CASE STUDY OF THE CAYAMBE-PEDRO MONCAYO IRRIGATION CANAL (ECUADOR)

Catalina Elizabeth Sandoval-Montenegro^{a,*}, Antonio Vázquez-Hoehne^a, Charles Jim Cachipiendo-Ulcuango^b

^a Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, c/ Mercator 2, 28031 Madrid, España.
 c.sandoval@alumnos.upm.es;  antonio.vazquez.hoehne@upm.es

^b Grupo de Investigación en Ciencias Ambientales, Universidad Politécnica Salesiana, Av. Natalia Jarrin y 9 de octubre, 170102 Cayambe, Ecuador.  ccachipiendo@ups.edu.ec

How to cite: C.E. Sandoval-Montenegro, A. Vázquez-Hoehne y C.J. Cachipiendo-Ulcuango. 2025. Integración de geomática participativa para la gestión sostenible del agua en sistemas de riego comunitarios: Caso de estudio canal de riego Cayambe-Pedro Moncayo (Ecuador). En libro de actas: *Quinto Congreso en Ingeniería Geomática*. Valencia, 2 – 3 de Julio de 2025. <http://dx.doi.org/10.4995/CIGeo2025.2025.19875>

Resumen:

El avance tecnológico en la geomática permite generar técnicas y herramientas que optimizan la planificación y mejoran la toma de decisiones en la gestión sostenible de sistemas de riego. Sin embargo, en sistemas de riego comunitarios en regiones con recursos hídricos limitados no se utilizan estas tecnologías, por lo que la distribución del agua se enfrenta a conflictos de equidad, eficiencia y sostenibilidad de los territorios. Estos problemas suelen estar relacionados con poca planificación técnica por la escasa información espacial actualizada e integración del conocimiento local para la toma de decisiones. Estas deficiencias impactan negativamente en la productividad agrícola y en la sostenibilidad de los elementos naturales de los territorios comunitarios. Así, el objetivo fue diseñar un modelo de distribución del agua sostenible basado en la geomática participativa comunitaria, que optimice la distribución del agua en sistemas de riego comunitarios, promoviendo la equidad y el uso eficiente de los sistemas de riego. El estudio de caso se realiza en el sistema de riego Cayambe-Pedro Moncayo Ecuador, considerando la integración de técnicas de SIG, teledetección y análisis espacial, con la participación activa de las comunidades beneficiarias. La metodología incluye la creación de un catastro dinámico de riego que combina datos geoespaciales con información recopilada mediante talleres comunitarios, la estimación de la demanda hídrica de los cultivos utilizando imágenes satelitales, y la geolocalización de los componentes del sistema de riego y la evaluación técnica mediante la medición participativa de caudales. Entre los resultados se establecen las necesidades hídricas según los sistemas de producción del territorio irrigado y mapas temáticos que facilitan poner en práctica el modelo de distribución del agua. Se concluye que la participación comunitaria fortalece la autodeterminación local, la cohesión social y el uso eficiente del agua en la agricultura aportando al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (acceso equitativo al agua, agricultura sostenible e inclusión social).

Palabras clave: Geomática participativa, Eficiencia técnica hídrica, Sistemas de riego comunitarios, Equidad en el riego, Territorios irrigados

Abstract:

Technological advancements in geomatics have enabled the development of techniques and tools that optimize planning and improve decision-making for the sustainable management of irrigation systems. However, in communal irrigation systems located in regions with limited water resources, these technologies are not often used. As a result, water distribution faces significant challenges related to equity, efficiency, and territorial sustainability. These issues are typically linked to a lack of technical planning, the absence of updated spatial information, and limited integration of local knowledge in the decision-making process. Such deficiencies negatively impact agricultural productivity and the sustainability of community-managed resources. Therefore, the objective of this research is to design a sustainable water distribution model based on community-based participatory geomatics, aimed at optimizing water allocation in communal irrigation systems, while promoting equity and the efficient use of irrigation infrastructure. The case study focuses on the Cayambe-Pedro Moncayo irrigation system in Ecuador and considers the integration of GIS techniques, remote sensing,

* Corresponding Author: Catalina Elizabeth Sandoval-Montenegro, c.sandoval@alumnos.upm.es

and spatial analysis with the active participation of the beneficiary communities. The methodology includes the creation of a dynamic irrigation cadastre that combines geospatial data with information collected through community workshops, the estimation of crop water demand using satellite imagery, the geolocation of irrigation system components, and the technical evaluation of the system through participatory flow measurements. The results include the identification of crop water requirements based on the productive systems within the irrigated territory, as well as thematic maps that support the implementation of the proposed water distribution model. It is concluded that community participation also strengthens local self-determination and social cohesion. This contributes to the achievement of the Sustainable Development Goals (equitable access to water, sustainable agriculture, and social inclusion).

Key words: Participatory geomatics, Technical water efficiency, Community irrigation systems, Irrigation equity, Irrigated territories

1. Introducción

La gestión sostenible del agua en la agricultura representa uno de los mayores desafíos en contextos rurales de América Latina, particularmente en los territorios andinos, donde confluyen condiciones de escasez hídrica, fragmentación territorial, y sistemas de producción basados en la organización comunitaria. En estas regiones, los sistemas de riego comunitarios son fundamentales para la seguridad alimentaria y el sostenimiento de los modos de vida indígenas y campesinos. Sin embargo, su eficiencia y equidad se ven limitadas por poca planificación técnica, carencia de datos geoespaciales actualizados y escasa incorporación del conocimiento local en la toma de decisiones (Boelens and Zwaantje 2014; Manida 2022).

Frente a estas limitaciones, la geomática participativa emerge como una alternativa metodológica que combina técnicas avanzadas de teledetección, sistemas de información geográfica (SIG) y modelado espacial, con procesos participativos que involucran activamente a las comunidades en la generación y uso de datos (Sishodia *et al.* 2020). Este enfoque permite identificar de forma más precisa las necesidades hídricas de los cultivos, mejorar la planificación del riego y fortalecer la gobernanza local del agua (Bwambale *et al.* 2022; Mathenge *et al.* 2022).

A pesar del avance tecnológico en geomática, su aplicación en sistemas comunitarios de riego sigue siendo escasa en países como Ecuador. La tecnificación del riego ha estado tradicionalmente enfocada en la infraestructura física, dejando de lado los aspectos de información espacial y planificación colaborativa que podrían potenciar la sostenibilidad y equidad del recurso (Cachipundo *et al.* 2017). Esta situación ha generado una brecha significativa entre las capacidades de gestión del agua en zonas rurales y las potencialidades ofrecidas por las tecnologías disponibles (Bwambale *et al.* 2022).

Este artículo presenta una experiencia metodológica aplicada en el sistema de riego Cayambe–Pedro Moncayo, ubicado en la Sierra Norte del Ecuador, donde se desarrolló y validó un modelo de distribución equitativa del agua basado en geomática participativa. A partir de la combinación de datos obtenidos a partir de datos satelitales (NDVI, Kc, ETc, Pe), cartografía SIG, evaluación técnica del sistema de riego y la participación activa de los actores presentes en el territorio (usuarios, academia, gobierno provincial), se construyó un modelo integral orientado a mejorar la eficiencia técnica, promover el acceso justo al recurso y fortalecer la sostenibilidad de los sistemas comunitarios.

El objetivo de este trabajo es diseñar y validar un modelo de distribución equitativa del agua en un sistema comunitario de riego, que integre tecnologías geomáticas y participación comunitaria como eje central. Este modelo busca responder a la necesidad de una gestión técnica, social y ambientalmente sostenible del recurso hídrico en territorios donde el agua es un bien común. Los resultados alcanzados contribuyen al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Cachipundo *et al.* 2025).

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

El sistema de riego Cayambe–Pedro Moncayo se localiza en la Sierra Norte del Ecuador, abarcando dos cantones de la provincia de Pichincha: Cayambe y Pedro Moncayo. La zona de influencia comprende más de 24000 hectáreas distribuidas en ocho parroquias rurales (Olmedo, Ayora, Ciudad Cayambe, Tupayachi, Tabacundo, La Esperanza, Tocachi y Malchinguí), y beneficia directamente a más de 10000 familias, en su mayoría pertenecientes al pueblo indígena Kayambi. La altitud varía entre los 2400 y 3500 m con condiciones agroecológicas diversas que influyen en los sistemas de producción.

2.2. Metodología

La Figura 1, presenta el esquema metodológico utilizado en esta investigación, el cual integra herramientas geomáticas, trabajo de campo y análisis matemático para lograr un modelo de distribución equitativa del agua de riego, con el objetivo de optimizar su uso y mejorar la eficiencia hídrica.

La metodología se estructura en las siguientes etapas:

1. Catastro dinámico de riego: A través de talleres participativos y herramientas geomáticas (SIG, INTERLIS y PgModel), se desarrolla un modelo conceptual y físico del sistema de riego. El catastro dinámico permite actualizar de manera continua la información sobre la infraestructura de riego, las parcelas agrícolas, y las características de los usuarios, facilitando una visión integral del sistema.

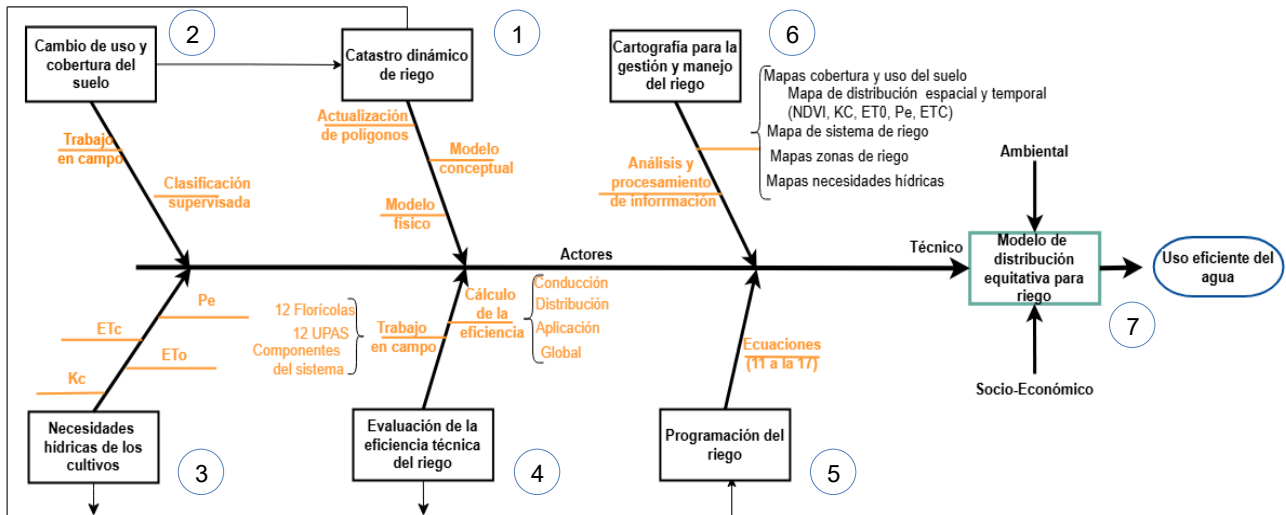


Figura 1: Esquema metodológico de la investigación.

2. Cambio de uso y cobertura del suelo: Incluye la recopilación de datos mediante trabajo de campo, GPS, ortofotos, inventarios, fotointerpretación y SIG. Se emplea la clasificación supervisada y la teledetección para identificar y actualizar los cambios en el uso y cobertura del suelo, generando mapas precisos que sirvan como insumo para las etapas posteriores. Los datos satelitales utilizados fueron de las misiones Landsat 5, 7 y 8 y Sentinel-2. Las imágenes son de los años 2000, 2001, 2011, 2012, 2019, 2020, 2022 y 2023, seleccionadas por su representatividad en la serie temporal de cambios de cobertura y en el comportamiento de los cultivos. La resolución espacial es de 30 m para Landsat y 10 y 20 m para Sentinel-2.
3. Determinación de las necesidades hídricas de los cultivos: Se calcularon los parámetros como el coeficiente de cultivo (K_c), a partir del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)). El NDVI se calcula a partir de los datos satelitales y mediante la Ec. (1):

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} \quad (1)$$

donde:

NIR = reflectancia en la banda del infrarrojo cercano

R = reflectancia en la banda roja

El NDVI es la diferencia expresada numéricamente entre -1 y 1. De acuerdo a la relación lineal entre el NDVI y el coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) (Campos *et al.* 2010; Heclman *et al.* 1982), se obtienen el coeficiente de cultivo mediante la Ec. (2):

$$K_{cb} = 1.44 \cdot NDVI - 0.1 \quad (2)$$

El coeficiente de cultivo basal oscila entre 0,15 y 1,15. Esta ecuación ha sido utilizada en los cultivos herbáceos (maíz, sorgo, trigo) (Odi-Lara *et al.* 2016) y leñosos (viñedos, manzanas) (Allen *et al.* 2006).

Para la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_0) y la evapotranspiración del cultivo

(ET_c), se utilizaron los datos de satelitales de las plataformas Climate Engine y Earthdata y la Ec. (3):

$$ET_c = K_{cb} \cdot ET_0 \quad (3)$$

Estos cálculos son esenciales para determinar la cantidad de agua requerida por los cultivos (N_h) en tiempo casi real, sin tomar en cuenta el almacenamiento del agua en el suelo y el posible ascenso desde la capa freática. Se emplearon las Ecuaciones (4), (5) y (6) (Arteaga *et al.* 2011; Villazón-Gómez *et al.* 2021):

$$Pe = 0.6 \cdot Pp - 10; \quad Pp \leq 70mm \quad (4)$$

$$Pe = 0.8 \cdot Pp - 24; \quad Pp > 70mm \quad (5)$$

$$N_h = ET_c - Pe \quad (6)$$

donde:

Pe = precipitación efectiva

Pp = precipitación efectiva

4. Evaluación de la eficiencia técnica del riego: Mediante medición en campo y análisis geomático, se evalúan las eficiencias de conducción, distribución, aplicación y global del sistema de riego. Los datos obtenidos se integran en una base de datos georreferenciada para identificar puntos críticos en la infraestructura y planificar mejoras. Para el cálculo de las eficiencias, se emplearon las siguientes Ecuaciones (7), (8), (9), y (10) (Cachipiendo 2017; Playan-Jubillar 1994):

$$ECP = \frac{CSR D}{CC} \quad (7)$$

donde:

ECP = eficiencia de la conducción principal

$CSR D$ = caudal suministrado a las redes de distribución

CC = caudal captado

$$EDI = \frac{\sum(CEP)}{CIRD} \quad (8)$$

donde:

EDI = eficiencia de la conducción principal

CEP = caudal entregado a las parcelas

CIRD = caudal de ingreso a la red de distribución

$$EAP = \frac{N_h}{CAD} \quad (9)$$

donde:

EAP = eficiencia de aplicación

Nh = necesidades hídricas de los cultivos

CAD = caudal aplicada por el dispositivo

$$ESR = \frac{EAP}{100} \cdot \frac{EDI}{100} \cdot \frac{ECP}{100} \quad (10)$$

donde:

ESR = eficiencia del sistema de riego

EAP = eficiencia de aplicación a la parcela

EDI = eficiencia de distribución

ECP = eficiencia de la conducción principal

Para evaluar la eficiencia de los sistemas de riego en el área de estudio, se utilizó la clasificación presentada en la Tabla 1 (Ortiz *et al.* 2021). Esta tabla establece rangos de eficiencia en función de diferentes componentes del sistema de riego. Cada una de estas eficiencias se clasifica en cuatro niveles de desempeño:

- Muy buena: Valores superiores a los límites más altos establecidos para cada eficiencia.
- Buena: Valores intermedios altos, indicando un desempeño adecuado.
- Regular: Valores moderados, que requieren ajustes en el sistema.
- Pobre: Valores inferiores, que reflejan ineficiencia significativa y necesidad de mejora.

Tabla 1: Categorización eficiencias para un sistema de riego.

<i>EFC</i> (%)	<i>EDI</i> (%)	<i>EAP</i> (%)	<i>ESR</i> (%)	Clasificación
>88,8	>88,6	>66,1	>38,8	Muy buena
79,1-88,7	80,1-88,5	52,1-66,0	29,6-38,7	Buena
56,8-79,0	65,1-80,0	40,3-52,0	20,3-29,5	Regular
<56,7	<65,0	<40,2	<20,2	Pobre

5. Programación del riego: Determina cuánto, cuándo y cómo regar los cultivos para lograr la máxima eficiencia y productividad en el uso del agua. Para esta investigación los cultivos seleccionados fueron los de mayor predominancia en el territorio de estudio siendo el cultivo de rosas bajo invernadero, maíz y pastos. Con la estimación de las necesidades hídricas de los cultivos mediante las herramientas y tecnologías geomáticas, se seleccionó el mes de mayor requerimiento hídrico.

A continuación, se describe los parámetros requeridos para la programación de riego.

Para calcular la humedad aprovechable, expresada en centímetros, se utilizó la Ec. (11). (Andrango *et al.* 2019; Fuentes and García 1999):

$$HA = \frac{CC - PMP}{100} \cdot Da \cdot P \quad (11)$$

donde:

HA = humedad aprovechable

CC = capacidad de campo

PMP = punto de marchitez permanente

Da = densidad aparente

P = profundidad de raíces del cultivo a regar

Estos datos se obtuvieron de los resultados de análisis de suelo que se hizo para el territorio de estudio con el laboratorio de la Universidad Politécnica Salesiana.

Para calcular la lámina neta (*LN*), se determinó mediante la Ec. (12) (Andrango *et al.* 2019; Fuentes and García 1999). Este cálculo permitió establecer la cantidad de agua que debe aplicarse en cada ciclo de riego para satisfacer las necesidades hídricas del cultivo, considerando la humedad disponible en el suelo y el umbral mínimo de humedad necesario para iniciar el riego.

$$LN = HA \cdot F \quad (12)$$

donde:

HA = humedad aprovechable

F = fracción de la humedad aprovechable o umbral de riego del 50%

Otro de los parámetros de la programación del riego es la frecuencia de riego en días (*FR*), que se calcula con la Ec. (13) (Andrango *et al.* 2019; Fuentes and García 1999), que permitió establecer el intervalo adecuado entre riegos para cubrir las necesidades hídricas del cultivo de manera eficiente.

$$FR = \frac{LN}{N_h} \quad (13)$$

Para calcular la dosis neta ajustada, se utilizó la Ec. (14) (Andrango *et al.* 2019; Fuentes and García 1999), que permite establecer la cantidad exacta de agua a aplicar en cada ciclo de riego, garantizando una distribución eficiente de los recursos hídricos.

$$Dn_{ajustada} = FR \cdot N_h \quad (14)$$

donde:

Dn ajustada = dosis neta ajustada en m³/ha

FR = frecuencia de riego en días

Nh = necesidades hídricas (m³/ha/día)

Otro parámetro a considerar en la programación del riego es el porcentaje de eficiencia de aplicación dependiendo del método de riego. En esta investigación los métodos identificados en el territorio de estudio de mayor uso es el método de aspersión y goteo. Para calcular la dosis total ajustada, expresada en m³/ha se empleó la Ec. (15). Este ajuste considera las pérdidas que

ocurren durante la distribución del agua, garantizando que la cantidad de agua aplicada sea la adecuada para optimizar el uso del recurso hídrico y cumplir con las necesidades del cultivo de manera eficiente.

$$Dt_{ajustada} = Dn_{ajustada} \cdot EAP \quad (15)$$

donde:

$Dt_{ajustada}$ = dosis total ajustada en m³/ha

$Dn_{ajustada}$ = dosis neta ajustada en m³/ha

Y para determinar el caudal continuo requerido para cada cultivo por unidad de superficie, en el intervalo de riego correspondiente al mes de mayor requerimiento hídrico, se utilizó la Ec. (16). Este cálculo permitió establecer el flujo de agua necesario para satisfacer las demandas hídricas del cultivo durante el período de mayor exigencia.

$$QR = \frac{Dt_{ajustada}}{FR} \quad (16)$$

donde:

QR = caudal requerido continuo unitario en l/s/ha

La distribución equitativa de recursos hídricos en sistemas de riego es un desafío crítico, especialmente en contextos de escasez de agua. Para esta investigación se emplea la Ec. (17), para programar el riego considerando el agua disponible para el sistema de riego, la superficie, el caudal requerido (de acuerdo a las necesidades hídricas), y la prioridad al sistema de producción presente en la parcela.

$$QA_i = \frac{S_i \cdot QR_i \cdot P_i}{\sum_{j=1}^n S_j \cdot QR_j \cdot P_j} \cdot QD \quad (17)$$

donde:

QA = caudal asignado a la parcela

S = área de la parcela en ha o m²

QR = caudal requerido del cultivo según las necesidades hídricas en l/s

P = prioridad que se le asigne a cada parcela dependiendo del sistema de producción (0 a 1)

n = número total de parcelas

QD = caudal total disponible para distribución en l/s

6. Cartografía para la gestión y manejo del riego: Generación de mapas temáticos, como los de cobertura del suelo, necesidades hídricas y distribución espacial y temporal del agua. Estos mapas son fundamentales para la toma de decisiones informadas y la planificación eficiente del riego.
7. Desarrollo del modelo de distribución equitativa para riego: El modelo integra aspectos técnicos, ambientales y socioeconómicos, utilizando tecnologías geomáticas avanzadas y un enfoque participativo. Busca garantizar un acceso equitativo

al agua y fomentar la sostenibilidad ambiental, social y económica en las comunidades beneficiarias.

3. Resultados

3.1. Catastro dinámico de riego y cambios en la cobertura y uso del suelo

El catastro permite registrar la infraestructura hidráulica, sistemas de producción agrícolas, usuarios, derechos (turnos) de riego y características productivas. Fue construido en PostgreSQL/PostGIS/pgModeler, y su modelo conceptual está estructurado por entidades como predios, usuarios, cultivos y redes de distribución. Esta herramienta facilita la actualización constante de datos y se convierte en un insumo fundamental para la programación del riego y la toma de decisiones. Los análisis multitemporales mostraron una transformación en la cobertura y uso del suelo durante el período 2000–2023 (Fig. 2). La expansión de cultivos permanentes como el pasto y las rosas, y la reducción de áreas forestales y de vegetación natural, fueron las principales tendencias observadas. El NDVI permitió caracterizar la dinámica de la vegetación, destacando un aumento en la productividad agrícola en zonas donde se intensificó el riego. Otro de los resultados fue el diseño y validación del catastro dinámico de riego, concebido como una base de datos geoespacial que integra información técnica, social y territorial.

3.2. Estimación de requerimientos hídricos de los cultivos

El NDVI (Fig. 3) fue procesado a partir de imágenes satelitales provenientes de las misiones Landsat y Sentinel-2, obteniendo curvas temporales que permitieron derivar el coeficiente de cultivo (Fig. 4) para pasto, maíz y rosas. A partir del K_c , se calculó la evapotranspiración del cultivo (Fig. 5) integrando datos de la evapotranspiración de referencia y precipitación efectiva (Fig. 6). Las necesidades hídricas de los cultivos (Fig. 7) fueron calculadas para el territorio en estudio, evidenciando diferencias según altitud, tipo de cultivo la cantidad de agua requerida para satisfacer la evapotranspiración del cultivo, considerando la precipitación efectiva.

3.3. Eficiencia técnica del sistema de riego

Se evaluaron las eficiencias de conducción, distribución y aplicación en distintas zonas del sistema. Los resultados evidencian una eficiencia media de conducción del 74% (Fig. 8), eficiencia de distribución del 65% (Fig. 9), eficiencia de aplicación del 55% para riego por aspersión, y del 68% para riego por goteo (Fig. 10). La Figura 11 muestra la eficiencia del sistema de riego en relación de los tres componentes: conducción, distribución y aplicación. Con los resultados de la evaluación de los 3 componentes, el sistema tiene una eficiencia del 38.26%, siendo una buena eficiencia.

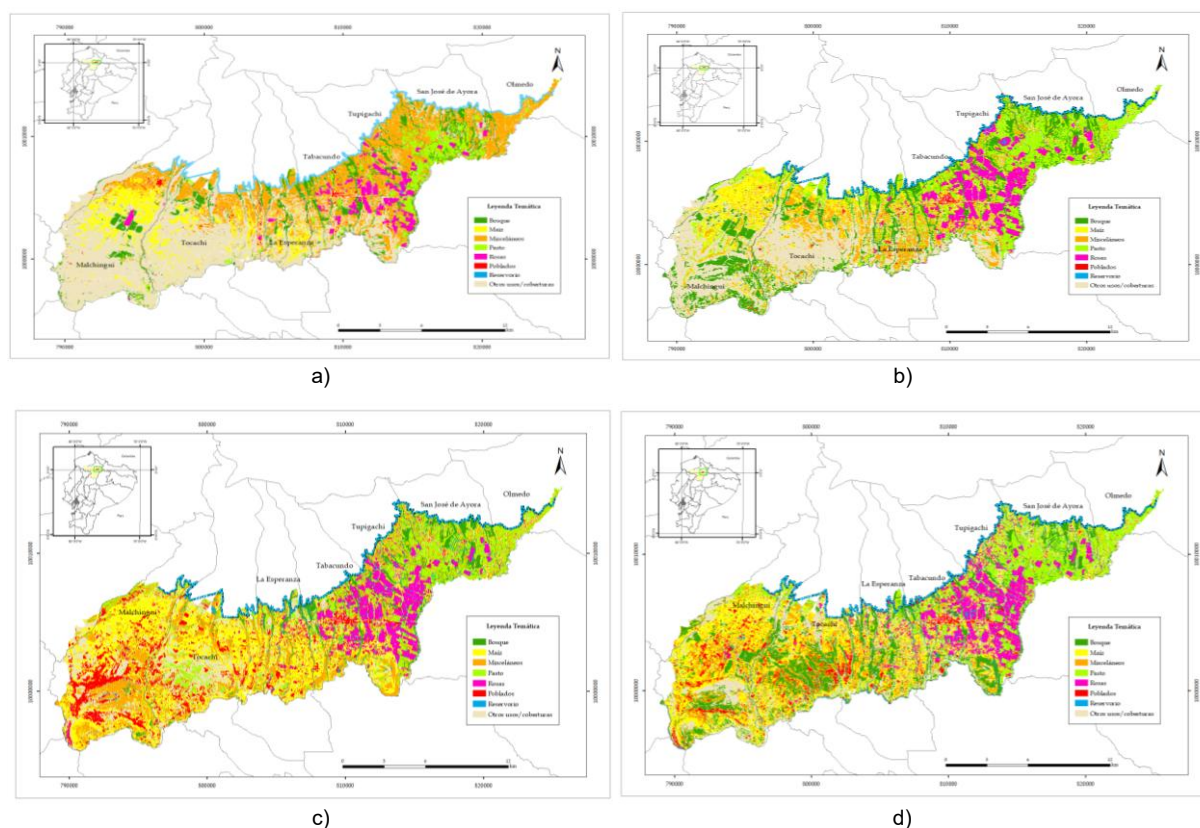


Figura 2: Mapa de uso y cobertura de suelo del territorio de estudio, años: a) 2000; b) 2012; c) 2020; d) 2023

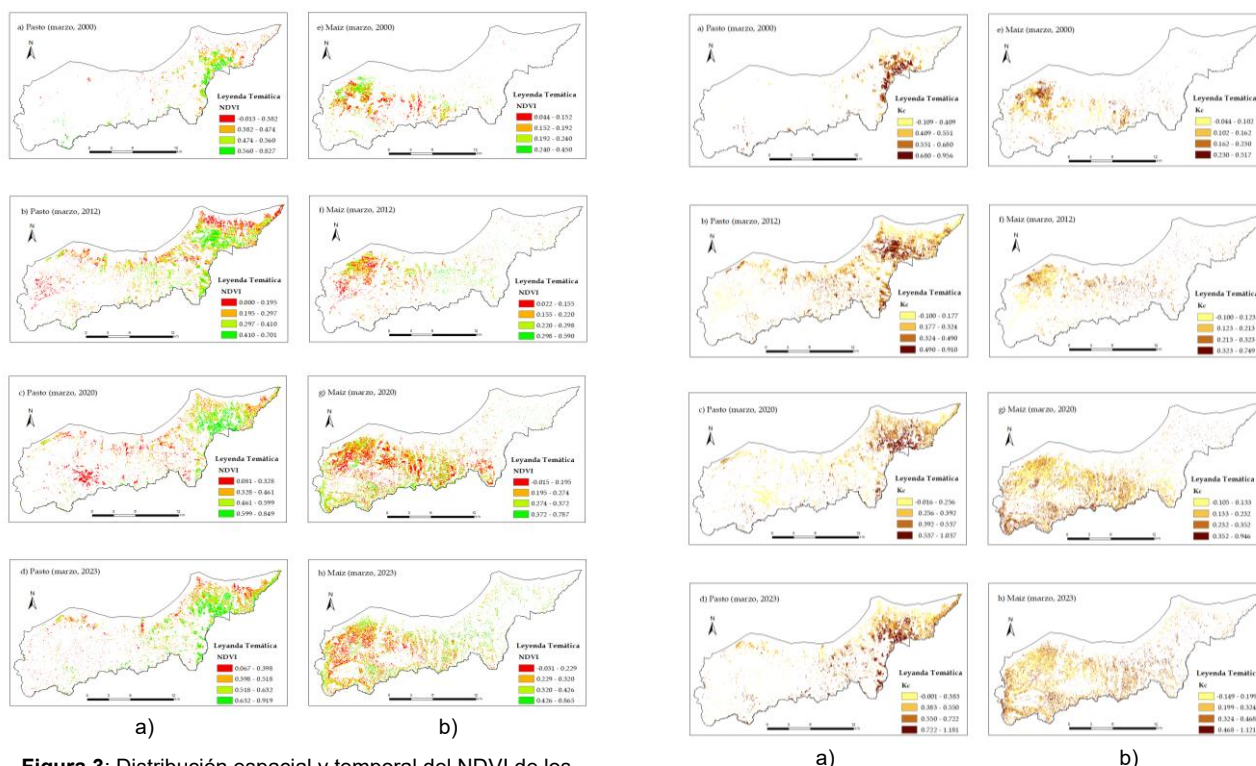


Figura 3: Distribución espacial y temporal del NDVI de los cultivos de pasto y maíz en 20 años: a) Pasto - marzo 2000, 2012, 2020 y 2023; b) Maíz - marzo 2000, 2012, 2020 y 2023.

Figura 4: Esquema Distribución espacial y temporal del coeficiente del cultivo (Kc) de pasto y maíz en 20 años: a) Pasto - marzo 2000, 2012, 2020 y 2023; b) Maíz - marzo 2000, 2012, 2020 y 2023.

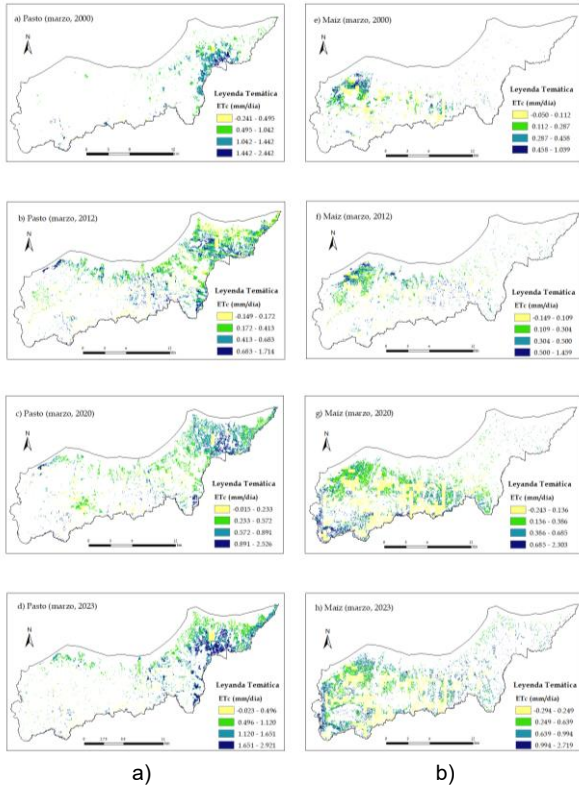


Figura 5: Distribución espacial y temporal de la evapotranspiración del cultivo de pasto y maíz en 20 años: a) Pasto - marzo 2000, 2012, 2020 y 2023; b) Maíz - marzo 2000, 2012, 2020 y 2023.

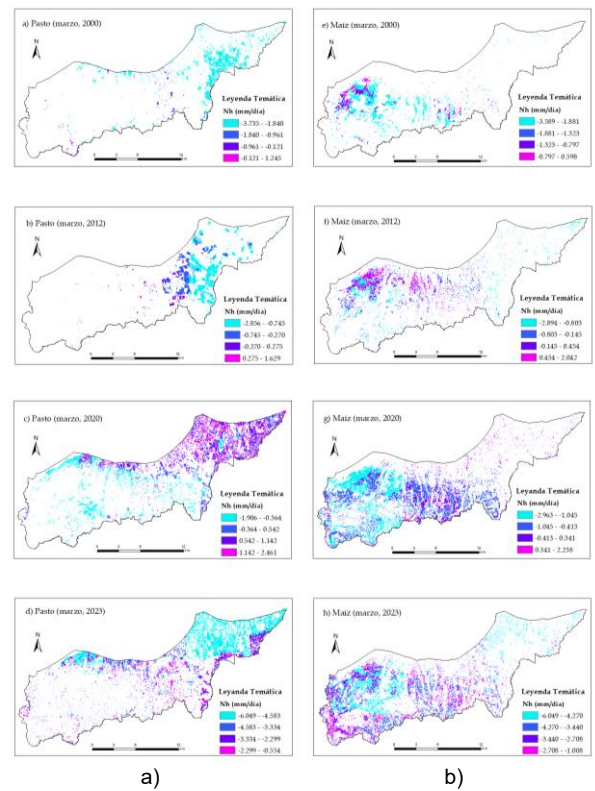


Figura 7: Distribución espacial y temporal de las necesidades hídricas del cultivo de pasto y maíz en 20 años: a) Pasto - marzo 2000, 2012, 2020 y 2023; b) Maíz - marzo 2000, 2012, 2020 y 2023.

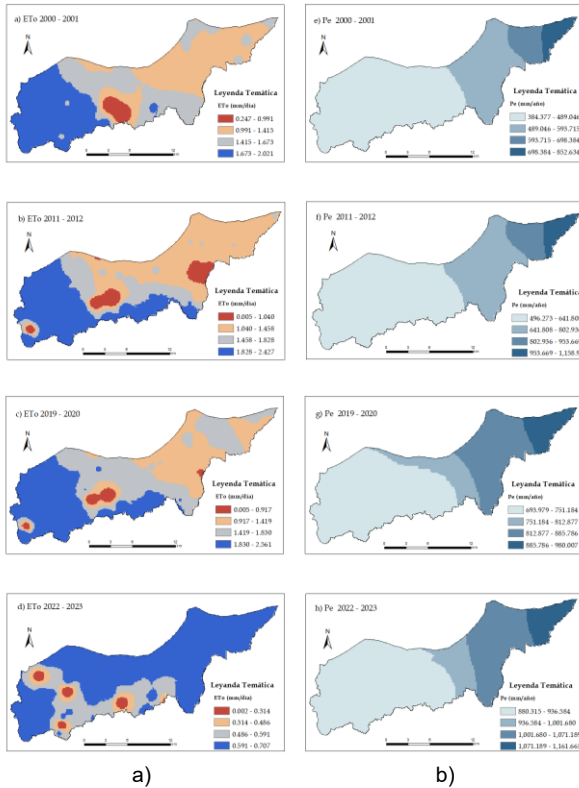


Figura 6: Distribución espacial y temporal de la precipitación efectiva y la evapotranspiración de referencia en 4 periodos: a) ETo del 2000-2001, 2011-2012, 2019-2020, 2022-2023; b) Pe del 2000-2001, 2011-2012, 2019-2020, 2022-2023.

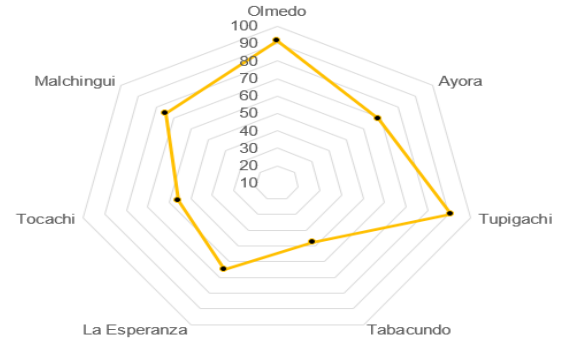


Figura 8: Comparación de la eficiencia de conducción (%) en diferentes tramos del sistema de riego Cayambe-Pedro Moncayo.

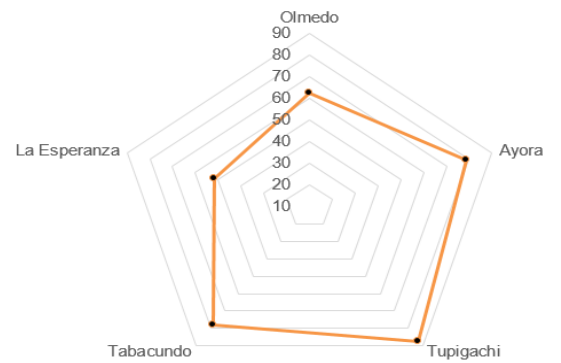


Figura 9: Comparación de la eficiencia de distribución (%) en diferentes tramos de las redes de distribución del sistema de riego Cayambe-Pedro Moncayo.

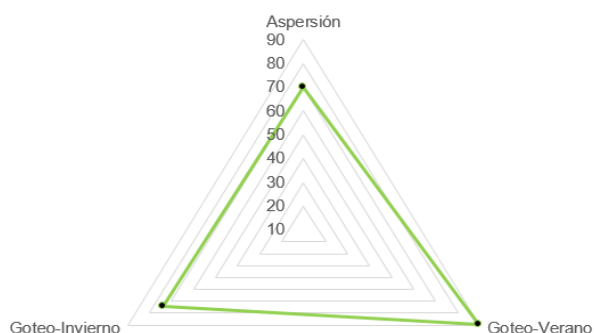


Figura 10: Comparación de la eficiencia de aplicación (%) por lo métodos de riego por aspersión y goteo.

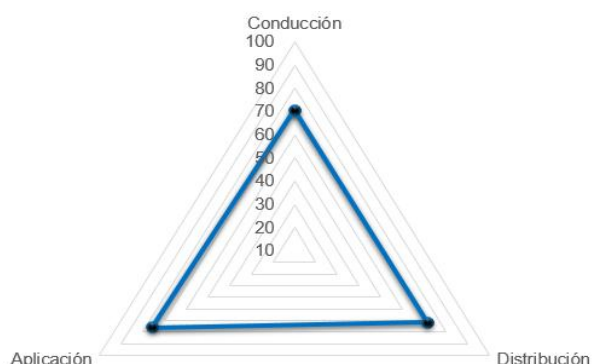


Figura 11: Eficiencia de los componentes del sistema de riego (%) Cayambe-Pedro Moncayo.

3.4. Programación del riego

La programación del riego se basó en la integración de las necesidades hídricas específicas de los cultivos principales (maíz, pastos y rosas) con el caudal aforado disponible en el sistema Cayambe–Pedro Moncayo. En la Tabla 2, se presenta la distribución del recurso hídrico de acuerdo con la superficie de cultivos por parroquia. La superficie total analizada fue de 10 860,54 ha, con un requerimiento hídrico total de 5 011,00 l/s. Los cultivos predominantes varían por parroquia, destacándose el maíz y los pastos como principales consumidores de agua (Tabla 3). Sin embargo, el caudal total disponible aforado en época seca asciende únicamente a 1727,27 l/s, representando apenas el 34,5% del caudal requerido. La distribución propuesta del caudal se realizó considerando la Ec. (17).

Tabla 2: Recurso hídrico por parroquia

Parroquia	Superficie (ha)	Caudal requerido (l/s)	Caudal asignado (l/s)
Olmedo	504,36	294,21	170,92
Ayora	1071,42	548,97	225,76
Tupigachi	2230,41	1074,99	438,24
Tabacundo	1302,26	624,73	94,45
La Esperanza	1430,57	625,86	181,84
Tocachi	1931,34	811,58	329,90
Malchingui	2390,16	1030,67	286,15
Total	10860,54	5011,00	1727,27

Tabla 3: Programación del riego por zona de estudio y cultivo.

Parroquia	Cultivo	Sup. (ha)	Caudal requerido (l/s)	Caudal asignado (l/s)
Olmedo	Maíz	44,53	25,07	21,14
	Pastos	440,27	259,03	137,89
	Rosas	19,56	10,11	11,89
Ayora	Maíz	113,80	47,29	148,11
	Pastos	836,73	439,21	54,80
	Rosas	120,90	62,47	22,85
Tupigachi	Maíz	328,36	142,68	398,55
	Pastos	801,26	363,54	33,47
	Rosas	1100,79	568,78	6,23
Tabacundo	Maíz	362,43	150,40	11,21
	Pastos	402,70	196,79	81,32
	Rosas	537,13	277,53	1,92
La Esperanza	Maíz	833,80	331,23	67,25
	Pastos	364,39	174,56	61,78
	Rosas	232,38	120,07	52,81
Tocachi	Maíz	1528,66	618,58	276,59
	Pastos	288,69	134,09	42,10
	Rosas	114,00	58,90	11,21
Malchingui	Maíz	2098,66	891,32	63,80
	Pastos	228,12	106,60	114,13
	Rosas	63,37	32,75	108,22

3.5. Modelo de distribución equitativa del agua

El modelo conceptual de distribución equitativa del agua fue construido mediante un proceso participativo que integró a usuarios, líderes comunitarios y técnicos especializados, incorporando perspectivas sociales, técnicas, económicas y ambientales. A través de reuniones y talleres de cartografía social, se promovió el diálogo y la representación colectiva de las dinámicas territoriales. Paralelamente, se utilizaron herramientas de geomática, como SIG y teledetección, para analizar las características espaciales y climáticas de la zona de estudio. El modelo resultante (Fig. 12) se estructura en torno a tres dimensiones interrelacionadas —ambiental, técnica y social— orientadas a garantizar una distribución justa del recurso hídrico y fomentar un uso eficiente y sostenible del agua en el territorio.

4. Discusiones

La implementación de un modelo de distribución equitativa del agua basado en tecnologías geomáticas y con la participación de los usuarios en los diferentes procesos de planificación del riego, mejora la eficiencia técnica del riego, promueve una asignación justa del recurso hídrico y contribuye a la sostenibilidad social, económica y ambiental de los territorios irrigados de las comunidades indígenas y campesinas.

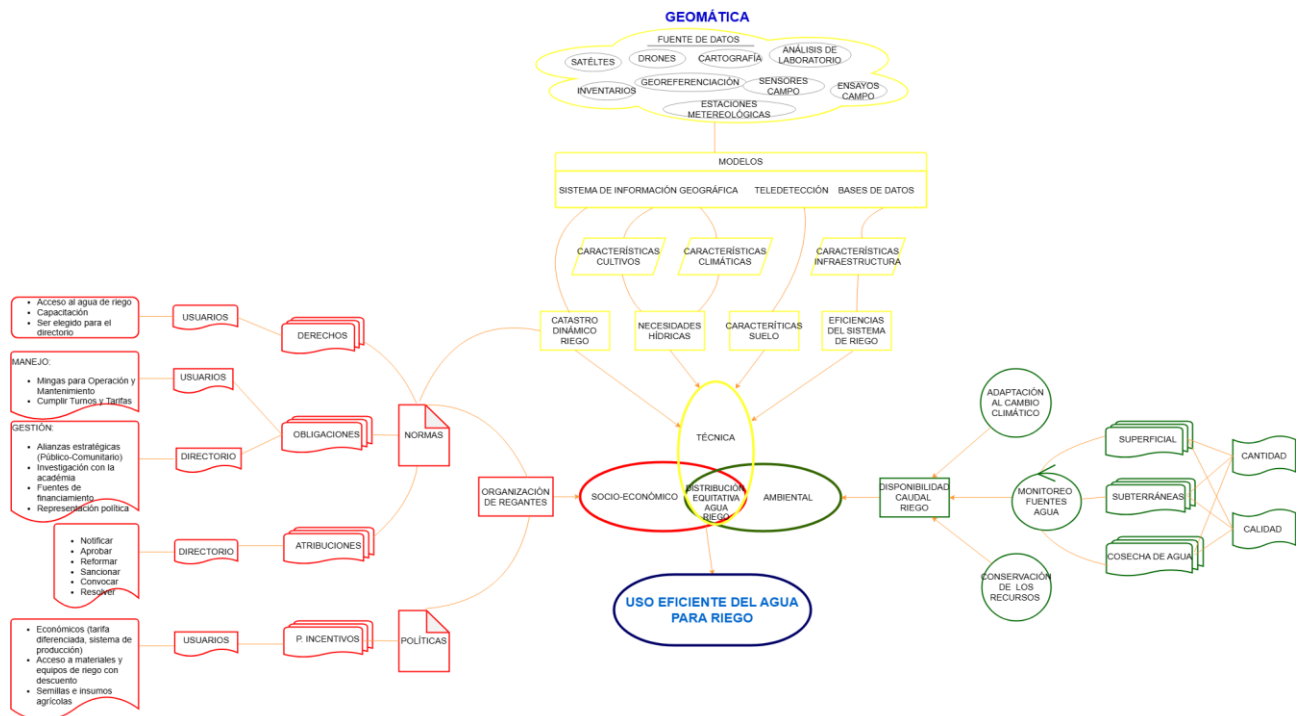


Figura 12: Modelo de distribución equitativa de agua.

Desde una perspectiva técnica, el desarrollo del catastro dinámico de riego permitió obtener registros actualizados y precisos en los sistemas comunitarios generados por los usuarios. Su implementación facilitó la toma de decisiones fundamentadas sobre programación y distribución del recurso, alineándose con las recomendaciones de (Ostrom and Gardner 1993) dando importancia a los sistemas de información confiables en la gestión colectiva del agua (Boelens *et al.* 2010).

La estimación de los requerimientos hídricos mediante el NDVI, junto con el cálculo de K_c , ET_c y P_e , demuestra la aplicabilidad de modelos de teledetección en territorios donde los datos meteorológicos convencionales son escasos. Esta técnica ha sido validada por estudios como (Calera *et al.* 2017), que permitió caracterizar con precisión la demanda de agua en distintos cultivos y zonas altitudinales, contribuyendo a una programación del riego más eficiente.

En cuanto a la eficiencia técnica, los resultados muestran que existen pérdidas significativas, especialmente en la etapa de aplicación, lo cual concuerda con otros estudios realizados en sistemas comunitarios de riego de América Latina (McCall 2003). Sin embargo, la incorporación de mapas temáticos y lineales de necesidades hídricas permitirán mejorar la planificación y distribución del agua, mostrando que el uso de SIG puede reducir la inequidad estructural en el acceso al recurso.

El modelo de distribución propuesto, al integrar criterios técnicos y sociales, contribuye a democratizar la gestión del agua. Su validación participativa incrementó la legitimidad del proceso, generando apropiación local del conocimiento. Esto refuerza la literatura sobre la coproducción de conocimiento como herramienta para la gobernanza inclusiva (Kim *et al.* 2015; Verchick and Hulen 2003).

Además, el enfoque metodológico participativo implementado en esta investigación demostró ser eficaz no solo para levantar información, sino para construir capacidades locales en el uso de herramientas geomáticas. Esta experiencia aporta evidencia de que es posible cerrar brechas tecnológicas mediante procesos de acompañamiento y fortalecimiento comunitario.

En un contexto más amplio, los resultados del estudio aportan al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular el ODS 6 (agua limpia y saneamiento), ODS 2 (hambre cero) y ODS 10 (reducción de desigualdades), demostrando que la innovación tecnológica puede estar al servicio de la equidad cuando se articula con procesos organizativos comunitarios.

5. Conclusiones

La geomática participativa se convierte en una herramienta estratégica para mejorar la eficiencia y equidad en los sistemas de riego comunitarios rurales. La integración de tecnologías geoespaciales con metodologías participativas permitió desarrollar un modelo de distribución de agua que responde tanto a criterios técnicos como a valores de justicia y sostenibilidad territorial. Entre los principales logros destaca la creación del catastro dinámico de riego, un instrumento georreferenciado y actualizable que sistematiza la información técnica, social y productiva, facilitando la planificación del recurso hídrico y el diseño de estrategias de riego más eficientes.

En términos técnicos, el uso combinado de imágenes satelitales, SIG y programación de riego basada en NDVI y coeficientes de cultivo demostró que es posible optimizar la eficiencia de los sistemas de riego, incluso en contextos con limitaciones de infraestructura

meteorológica. Además, la evaluación participativa de la eficiencia del sistema permitió construir un modelo de gestión del agua más equitativo, transparente y adaptable a las necesidades locales.

A nivel social, el enfoque participativo fortaleció la gobernanza comunitaria, promovió la apropiación del conocimiento y legitimó colectivamente el modelo desarrollado. Se concluye que la geomática participativa

no solo mejora la operación técnica de los sistemas de riego, sino que también impulsa una gestión más inclusiva y resiliente del agua, contribuyendo al cumplimiento de los ODS. Este enfoque puede ser replicado en otras regiones rurales, adaptándolo a los contextos locales y promoviendo la colaboración entre comunidades, academia y gobiernos.

References

- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., and SMITH, M., 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *Roma: FAO*, **298**(0).
- ANDRANGO, P., ORTÍZ, R., and CUASPA, Y., 2019. Distribución de caudales de riego para las comunidades de la UCICMA - Imbabura. *Siembra*, **6**, pp. 037–045. DOI: 10.29166/siembra.v6i2.1562
- ARTEAGA, R., ÁNGELES, V., and VÁZQUEZ, M., 2011. Programa Cropwat Para Planeación Y Manejo Del Recurso Hídrico. *Rev. Mex. Ciencias Agrícolas*, **2**, pp. 179–195.
- BOELEN, R., GETCHES, D., and GUEVARA-GIL, A., 2010. Out of the Mainstream: Water Rights, Politics and Identity.
- BOELEN, R., and ZWAANTJE, M., 2014. Justicia Hídrica. Acumulación de agua, conflictos y acción social. *Inst. Estud. Peru*, **1**, pp. 13–27.
- BWAMBALE, E., NAANGMENYELE, Z., IRADUKUNDA, P., AGBOKA, K.M., HOUSSOU-DOSSOU, E.A., AKANSAGE, D.A., ... and CHIKABVUMBWA, S.R., 2022. Towards precision irrigation management: A review of GIS, remote sensing and emerging technologies. *Cogent Engineering*, **9**(1), 2100573. DOI: 10.1080/23311916.2022.2100573
- CACHIPUENDO, C., 2017. Modelo dinâmico para a gestão e manejo sustentável de sistemas de irrigação comunitários, no marco do Bom Viver: estudo do caso na bacia do Rio Pisque. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz.”
- CACHIPUENDO, C., REQUELME, N., GUALAVISÍ, O., SANDOVAL, C., and SANDOVAL, J., 2017. Uso comunitario del agua y del suelo para la producción sustentable de pasturas. *La Granja*, **26**, pp. 142–154.
- CACHIPUENDO, C., REQUELME, N., SANDOVAL, C., and AFONSO, A., 2025. Sustainable Rural Development Based on CFS-RAI Principles in the Production of Healthy Food: The Case of the Kayambi People (Ecuador). *Sustain.*, **17**, pp. 1–21. DOI: 10.3390/su17072958
- CALERA, A., CAMPOS, I., OSANN, A., D'URSO, G., and MENENTI, M., 2017. Remote sensing for crop water management: From ET modelling to services for the end users. *Sensors (Switzerland)*, **17**, pp. 1–25. DOI: 10.3390/s17051104
- CAMPOS, I., NEALE, C.M.U., CALERA, A., BALBONTÍN, C., and GONZÁLEZ-PIQUERAS, J., 2010. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agric. Water Manag.*, **98**, pp. 45–54. DOI: 10.1016/j.agwat.2010.07.011
- FUENTES, J., and GARCÍA, G., 1999. Técnicas de riego. Sistemas de riego en la agricultura. *México y España: Mundi-Prensa México, SA de CV*.
- HECLMAN, J.L., HEILMAN, W.E., and MOORE, D.G., 1982. Evaluating the Crop Coefficient Using Spectral Reflectance 1. *Agron. J.*, **74**, pp. 967–971. DOI: 10.2134/agronj1982.00021962007400060010x
- KIM, J.H., KEANE, T.D., and BERNARD, E.A., 2015. Fragmented local governance and water resource management outcomes. *J. Environ. Manage.*, **150**, pp. 378–386. DOI: 10.1016/j.jenvman.2014.12.002
- MANIDA, M., 2022. The future of food and agriculture trends and challenges. *Agriculture & Food E-Newsletter*, **4**(2), pp. 27–29.
- MATHENGE, M., SONNEVELD, B.G.J.S., and BROERSE, J.E.W., 2022. Application of GIS in Agriculture in Promoting Evidence-Informed Decision Making for Improving Agriculture Sustainability: A Systematic Review. *Sustain.*, **14**. DOI: 10.3390/su14169974
- MCCALL, M.K., 2003. Seeking good governance in participatory-GIS: A review of processes and governance dimensions in applying GIS to participatory spatial planning. *Habitat Int.*, **27**, pp. 549–573. DOI:10.1016/S0197-3975(03)00005-5
- ODI-LARA, M., CAMPOS, I., NEALE, C. M., ORTEGA-FARÍAS, S., POBLETE-ECHEVERRÍA, C., BALBONTÍN, C., and CALERA, A., 2016. Estimating evapotranspiration of an apple orchard using a remote sensing-based soil water balance. *Remote Sensing*, **8**(3), 253. DOI: 10.3390/rs8030253
- ORTIZ, R., PAZMIÑO, J., and CHILE, M., 2021. Eficiencias en el sistema de riego Tumbaco, Ecuador. *Cienc. y Tecnol.*, **14**, pp. 1–10.

- OSTROM, E., and GARDNER, R., 1993. Coping with Asymmetries in the Commons: Self-Governing Irrigation Systems Can Work. *J. Econ. Perspect.*, **7**, pp. 93–112. DOI: 10.1257/jep.7.4.93
- PLAYAN-JUBILLAR, E., 1994. Eficiencia en el Aprovechamiento de Agua por Regadío. Escuela Politécnica Superior de Huesca. *Geórgica: revista del espacio rural*, **3**, pp. 99-128 (1994)
- SISHODIA, R.P., RAY, R.L., and SINGH, S.K., 2020. Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. *Remote Sens.*, **12**, pp. 1–31. DOI: 10.3390/rs12193136
- VERCHICK, R.R.M., and HULEN, R.M., 2003. Why the global environment needs local government: Lessons from the Johannesburg summit. *Urban Lawyer*, **35**, pp. 471–494.
- VILLAZÓN-GÓMEZ, J.A., NORIS-NORIS, P., and MARTÍN-GUTIÉRREZ, G., 2021. Determinación de la precipitación efectiva en áreas agropecuarias de la provincia de Holguín. *Idesia* (Arica), **39**, pp. 85–90. DOI: 10.4067/s0718-34292021000200085

CIENCIA CIUDADANA GEOGRÁFICA COMO FUENTE DE DATOS EN LA INGENIERÍA GEOMÁTICA

GEOGRAPHIC CITIZEN SCIENCE AS A DATA SOURCE IN GEOMATICS ENGINEERING

Sandra Lucía Hernández-Zetina^{a, b, *}, Ana Belén Anquela-Julián^b, Ángel Esteban Martín-Furones^b

^a Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México, Cerro de Coatepec s/n, Ciudad Universitaria, 50110 Toluca, México. , slherzet@doctor.upv.es

^b Escuela Técnica Superior de Ingeniería Geodésica, Cartográfica y Topográfica, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España. , anquela@upv.edu.es; , aemartin@upvnet.upv.es

How to cite: S.L. Hernández-Zetina, A.B. Anquela-Julián y Á.E. Martín-Furones. 2025. Ciencia ciudadana geográfica como fuente de datos en la ingeniería geomática. En libro de actas: *Quinto Congreso en Ingeniería Geomática*. Valencia, 2 – 3 de Julio de 2025. <http://dx.doi.org/10.4995/CIGeo2025.2025.19899>

Resumen:

Este artículo presenta una experiencia de ciencia ciudadana geográfica mediante el desarrollo de una plataforma de cartografía participativa orientada a visibilizar la percepción de inseguridad en el espacio urbano. La iniciativa se implementó en dos ciudades Toluca (México) y Valencia (España), con estrategias de convocatoria adaptadas a cada contexto: mapatones presenciales en Toluca y difusión digital en redes sociales en Valencia. El conjunto de datos resultante se publicó bajo los principios FAIR, promoviendo su accesibilidad, interoperabilidad y reutilización en investigaciones futuras. Para ilustrar su potencial analítico, se desarrollaron *dashboards* interactivos que permiten explorar de forma dinámica los patrones espaciales identificados. En contextos de bajo presupuesto, se priorizó el desarrollo de un aplicativo web sobre aplicaciones móviles, facilitando su mantenimiento y garantizando una participación más inclusiva al eliminar barreras tecnológicas. Esta decisión refuerza un enfoque geomático centrado en la participación ciudadana y en el aprovechamiento del conocimiento local. Además, iniciativas como esta contribuyen al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular aquellos relacionados con ciudades seguras e inclusivas (ODS 11) y la igualdad de género (ODS 5), al generar evidencia útil para la toma de decisiones basadas en datos abiertos y colaborativos.

Palabras clave: Geomática, Cartografía Participativa, Ciencia Ciudadana Geográfica, ODS

Abstract:

This article presents an experience of geographic citizen science through developing a participatory mapping platform to visualize the perception of insecurity in urban space. The initiative took place in Toluca (Mexico) and Valencia (Spain), with convening strategies adapted to each context: face-to-face mapathons in Toluca and digital dissemination in social networks in Valencia. The resulting dataset was published under FAIR principles, promoting its accessibility, interoperability, and reuse in future research. The team developed interactive dashboards to explore the spatial patterns identified dynamically. In low-budget contexts, web application development was prioritized over mobile applications, facilitating maintenance and guaranteeing more inclusive participation by eliminating technological barriers. This decision reinforces a geomatics approach focused on citizen participation and the use of local knowledge. In addition, initiatives such as this contribute to fulfilling the Sustainable Development Goals, particularly those related to safe and inclusive cities (SDG 11) and gender equality (SDG 5), by generating proper evidence for decision-making based on open and collaborative data.

Key words: Geomatics, Participatory Mapping, Geographic Citizen Science, SDG

1. Introducción

En los procesos de toma de decisiones, particularmente aquellos vinculados a la gestión y planificación territorial, la disponibilidad de datos precisos y pertinentes es un requisito indispensable. En este marco, la geomática se configura como una ciencia especializada encargada de la recolección, procesamiento, análisis y visualización

de datos relacionados con el territorio. Su aporte resulta crucial para comprender las interacciones entre el espacio y las dinámicas sociales, económicas y ambientales (Fuenzalida *et al.* 2015).

Sin embargo, el concepto de geomática presenta diversas definiciones y alcances, los cuales varían en función del contexto geográfico, institucional o

* Corresponding Author: Sandra Lucía Hernández-Zetina, slherzet@doctor.upv.es

disciplinario en el que se aplique. Podemos entonces tomar la siguiente definición:

“La geomática es el conocimiento y la capacidad de utilizar sistemas de información para integrar datos sobre objetos espaciales y fenómenos espacio-temporales relacionados con la superficie de la Tierra, con el fin de realizar análisis espaciales, prever y visualizar su estado y sus cambios.” (Krawczyk 2022).

La definición del término Geomática y su contexto de uso ha experimentado cambios sucesivos desde los inicios en que dicho término se acuñó, considerando que sigue en desarrollo debido a la interacción entre las diversas disciplinas que la conforman y el avance de las geotecnologías con las que se apoya, dando lugar a significativos progresos en la adquisición y volumen de datos que se pueden obtener, a partir de diversos medios y plataformas (Krawczyk 2022). En este sentido, es importante resaltar dos elementos de los datos en la geomática: tipo y volumen. En cuanto al tipo se le denomina dato geoespacial, el cual está referido a elementos asociados con una localización específica en la Tierra, que incluyen fenómenos o procesos de tipo natural o social, así como una ocurrencia temporal. En relación con el volumen, los avances en las tecnologías de información, en particular las relacionadas con percepción remota y otras fuentes de adquisición y recolección, han llevado no solo a la masificación de los datos geoespaciales (*geospatial big data*), sino también han reducido su costo de producción (Selmy *et al.* 2024).

Diversos actores sociales, entre ellos la ciudadanía, las comunidades, el sector empresarial y los gobiernos, obtienen cotidianamente beneficios (en muchos casos de forma inadvertida) del uso de información geoespacial y de los servicios vinculados a la localización. Esto se debe a que dicha información actúa como un vínculo digital entre los espacios geográficos, sus habitantes y las dinámicas que en ellos se desarrollan, permitiendo representar y analizar fenómenos en términos de su localización, naturaleza y causas. Además, esta información resulta fundamental para modelar y comprender tanto los efectos de acontecimientos pasados y presentes como las proyecciones de posibles escenarios futuros (UN-GGIM 2020).

Los datos geoespaciales constituyen un recurso estratégico para una amplia gama de sectores tanto del ámbito público como del privado, ya que permiten analizar patrones espaciales, optimizar recursos y formular intervenciones más eficaces en función del territorio. Su utilidad se ha demostrado en campos como la gestión ambiental, la planificación urbana, la salud pública y la seguridad, pero también resulta clave en el monitoreo y evaluación del cumplimiento de los ODS de la Agenda 2030. Sin embargo, a pesar de los avances en tecnologías, en numerosos países y regiones persiste una escasez significativa de datos geoespaciales actualizados, accesibles y estandarizados. Esta brecha limita la capacidad de diseñar políticas públicas basadas en evidencia territorial, lo cual representa un desafío crítico para el logro de los ODS (UN-GGIM 2020).

Se torna relevante explorar otras fuentes de información que permitan ampliar los análisis específicos sobre

diversas temáticas, y que apoyen el monitoreo y evaluación del cumplimiento de las metas e indicadores de los ODS y otros marcos de trabajo internacionales similares.

Estas fuentes de información y el flujo de datos asociado pueden clasificarse en tradicionales y no tradicionales. Dentro de la primera clasificación, se encuentran los Instituciones Nacionales de Estadística, los ministerios y agencias gubernamentales, así como las organizaciones internacionales que proporcionan información a través de censos, encuestas y estudios. En la segunda clasificación, se encuentran los datos comerciales (como los registros derivados de la telefonía móvil), las redes de sensores oficiales que a través de estaciones permiten capturar datos relacionados con la hidrología, el clima, la contaminación, entre otros, así como las Infraestructuras de Datos Espaciales, la Observación de la Tierra (OT), y los Datos Generados por la Ciudadanía (DGC) a través de la participación en proyectos de ciencia ciudadana, el uso de redes sociales, dispositivos móviles y *weareables* (Fritz *et al.* 2019). Huang *et al.* (2024), además de los datos a través de OT, especifican una fuente adicional a la que denominan Observaciones Humanas (OH). En todos ellos podemos identificar que los datos geoespaciales están presentes y que, a través de los procesos, metodologías de la geomática, se pueden desarrollar herramientas para la generación de conjuntos de datos.

Existen una serie de tareas que sustentan las iniciativas de DGC, en donde el flujo de trabajo incluye la definición de los datos que se requieren, como se pueden producir, la forma de enriquecerlos, analizarlos y difundirlos (GPSDD 2025).

Una forma de integrar DGC es a partir de la participación de la ciudadanía en proyectos de investigación colaborativos, surgiendo así el concepto de ciencia ciudadana que “consiste en una práctica emergente en la que científicos y ciudadanos legos participan en el desarrollo de tareas de investigación, con el propósito de generar nuevos conocimientos destinados tanto a la academia como a la sociedad civil.” (Blasco *et al.* 2021).

Los enfoques de la ciencia ciudadana incrementan la recopilación de información que represente situaciones reales. Además, la ciencia ciudadana permite obtener datos detallados o desagregados a partir de la ubicación, género, discapacidad, raza y otros factores demográficos (Fraisl *et al.* 2025). Adicionalmente, implica un cambio en la forma de recolectar datos, pues facilita la participación de la ciudadanía en ámbitos que históricamente han estado reservados a especialistas y entidades oficiales. Este proceso de democratización ha ampliado tanto la variedad de datos accesibles con una pluralidad de enfoques, generando así una comprensión más detallada y multidimensional no sólo de las dinámicas sociales, sino también de los procesos de cambio ambiental (Huang *et al.* 2024). Existen diversos aspectos que demandan una atención prioritaria con el fin de integrar eficazmente los enfoques de la ciencia ciudadana para potenciar al máximo sus capacidades y beneficios (Fraisl *et al.* 2023).

En el caso de la geomática, como parte de la Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica, el término de

ciencia ciudadana se enmarca bajo la conceptualización de Información Geográfica Voluntaria (VGI por sus siglas en inglés), y que algunos autores han denominado Ciencia Ciudadana Geográfica (CCG), que incluye actividades en las cuales el levantamiento de datos e información sobre la ubicación es parte integral de este tipo de proyectos. El crecimiento de la ciencia ciudadana geográfica es visible en los últimos años, demostrando su efectividad en ámbitos como la biodiversidad, la contaminación atmosférica o el registro de la configuración de las ciudades (Haklay 2013).

Es importante identificar los objetivos y alcances que se pretenden obtener al interactuar con la gente, especificando de qué forma la ciudadanía podría apoyar en la recopilación de la información que hace falta para abordar el problema de estudio, eligiendo el enfoque que será más útil, “no sólo mediante la producción de nuevos datos, sino también mediante el enriquecimiento y análisis de los datos (oficiales) existentes” (GPSDD 2025).

Para el propósito de este trabajo, nos enfocaremos a las OH a partir de CCG, para la generación (adquisición) de un conjunto de datos a través del desarrollo de una plataforma de cartografía participativa que apoyen dos de los ODS; el número 5 en su meta 5.2 que se refiere a eliminar todas las formas de violencia contra las mujeres y las niñas en los ámbitos público y privado, incluidas la trata y la explotación sexual y otros tipos de explotación, enfatizando y que de soporte al indicador 5.2.2 para determinar la proporción de mujeres y niñas a partir de 15 años de edad que han sufrido violencia sexual a manos de personas que no eran su pareja en los últimos 12 meses, desglosada por edad y lugar del hecho. De igual forma, el ODS 11 en su meta 11.3 Aumentar la urbanización inclusiva, sostenible y la capacidad para la planificación y gestión participativa, integrada y sostenible de asentamientos humanos, que apoye el indicador 11.3.2 Proporción de ciudades que cuentan con una estructura de participación de la sociedad civil en la planificación y gestión urbanas.

2. Metodología

El desarrollo de una plataforma cartográfica participativa a través de CCG, implica una metodología estructurada (Fig. 1) que garantice la recopilación, validación y análisis de los datos geospaciales obtenidos en grupos controlados y a través de Redes Sociales (RRSS).

Los pasos de esta metodología se describen en las Secciones siguientes.

2.1. Definición del instrumento y de los elementos de captura para la plataforma de cartografía participativa a través de CCG

La fase inicial consiste en definir el instrumento de cartografía participativa y sus elementos de captura de datos a través de formularios para determinar la percepción de inseguridad o eventos de acoso callejero, considerando la integración de una herramienta geomática cuya usabilidad y experiencia del usuario garantice la inclusión y la pertinencia de los rubros para los ODS 5 y 11. Este paso estableció el diseño y estructuración de la base de datos, así como la funcionalidad para la recopilación de los elementos de

captura, incluido el diseño de las características cartográficas y la identificación de las variables geospaciales clave.



Figura 1: Esquema metodológico para el desarrollo de plataforma de cartografía participativa.

A partir del análisis de requerimientos se estableció un modelo de datos que permite la georreferenciación de puntos específicos dentro del entorno urbano. Cada punto reportado por las usuarias puede corresponder a una de tres categorías: (1) incidentes de acoso callejero, (2) espacios que, por sus características físicas o condiciones de infraestructura —como iluminación deficiente—, generan una percepción de inseguridad, y (3) una categoría compuesta que identifica lugares donde las usuarias han experimentado simultáneamente acoso callejero y perciben un entorno inseguro.

2.2. Automatización del instrumento en una aplicación web responsiva

Tras la fase de definición, el instrumento cartográfico se automatizó e implementó integrando estándares de diseño web, de tal forma que la funcionalidad del aplicativo (Fig. 2) considera elementos de usabilidad y experiencia de usuario (UX por sus siglas en inglés), bajo criterios de diseño centrado en el usuario, conjuntando simplicidad, claridad, así como textos concisos y elementos visuales que faciliten la participación de públicos no especializados (Gertrudix et al. 2024).

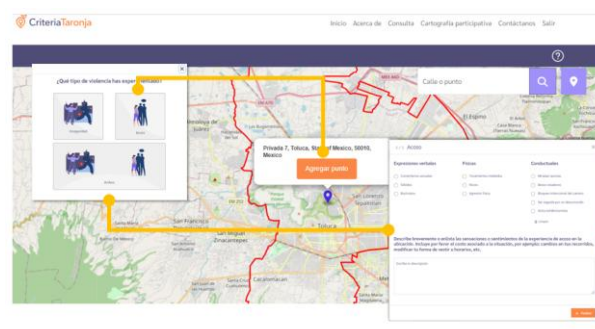


Figura 2: Aplicativo que integra elementos centrados en el usuario.

La implementación de una aplicación web responsiva garantiza la accesibilidad a través de diversos dispositivos, independiente del sistema operativo o plataforma (Fig. 3), para dar oportunidad de participación a un mayor número de usuarios para aportar datos.

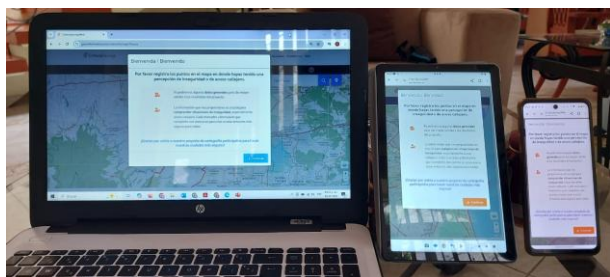


Figura 3: Plataforma web de cartografía participativa responsiva.

2.3. Socialización y difusión a grupos focales y de interés mediante mapatones y RRSS

Con el objetivo de involucrar a los grupos de interés, la plataforma se difunde a través de actividades de socialización como los llamados mapatones. Estos eventos funcionan como talleres participativos en los que las personas que colaboran reciben capacitación para utilizar la plataforma y contribuir con datos geoespaciales. Además de facilitar el aprendizaje y la interacción directa con la herramienta, los mapatones promueven la participación activa de comunidades específicas, fortaleciendo el sentido de apropiación del proceso y el valor del conocimiento local (Fig. 4).

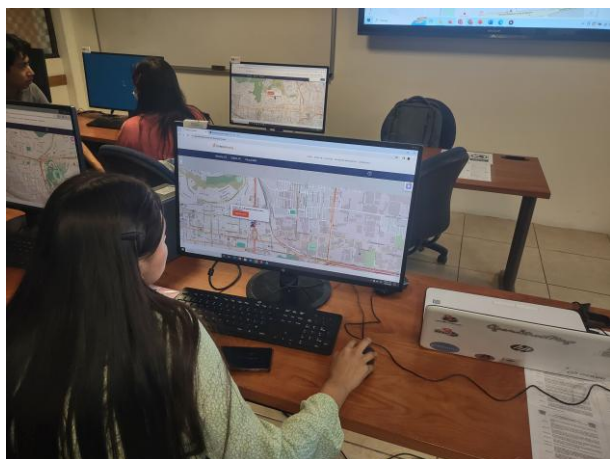


Figura 4: Uso de la plataforma en convocatoria de mapatones.

De igual forma, la difusión a través de RRSS sensibiliza sobre los objetivos de la plataforma, con el propósito de contar con un conjunto de datos diverso y representativo (Fig. 5).

2.4. Seguimiento y validación del conjunto de datos

Para la adquisición de los datos, la plataforma incorpora mecanismos de validación en la etapa de captura. Este paso implica procesos de control de calidad orientados a garantizar la precisión, coherencia y fiabilidad de la información geoespacial. Uno de los elementos más relevantes en este proceso fue la restricción espacial que solo permitió registrar puntos dentro del polígono o límite administrativo oficialmente reconocido de cada ciudad, lo cual evitó errores de localización o reportes fuera del área de estudio. Adicionalmente, el conjunto de datos fue sometido a un proceso de limpieza,

verificación de consistencia en los atributos y estructuración conforme a principios de datos abiertos, asegurando su interoperabilidad y adecuación para análisis geoespacial en entornos especializados.



Figura 5: Convocatoria en RRSS.

2.5. Análisis de la información para la generación de resultados con indicadores geoespaciales

La fase final se centra en la visualización y análisis de los datos recopilados para generar resultados significativos a partir de técnicas de análisis geoespacial para obtener indicadores que sirvan de base para la toma de decisiones.

Las incidencias reportadas en la plataforma contemplan un marco temporal comprendido entre el año 2020 y 2024, y corresponden a experiencias pasadas y presentes reportadas voluntariamente por las usuarias durante los ejercicios de mapeo participativo y las convocatorias abiertas en RRSS.

3. Resultados y discusión

El ejercicio de CCG se implementó en dos ciudades, aplicando estrategias de convocatoria diferenciadas en una primera etapa. En Toluca (México), la participación se promovió mediante la organización de mapatones presenciales, lo que permitió una interacción directa con las participantes y un acompañamiento en el proceso de mapeo. En contraste, en Valencia (España), la convocatoria se llevó a cabo a través de la difusión del proyecto en RRSS y teniendo como soporte un tutorial en línea, apostando por una estrategia para incentivar la participación autónoma y remota. Estas aproximaciones reflejan la adaptación contextual de la metodología para fomentar la colaboración ciudadana en distintos entornos socioterritoriales.

Como resultado del desarrollo y puesta en marcha de la plataforma de cartografía participativa, se generó un conjunto de datos georreferenciados que fue puesto a disposición del público bajo los principios FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable, Reusable*) (Anquela *et al.* 2025). Esta apertura de los datos no solo facilita su localización y acceso mediante identificadores persistentes y formatos estandarizados, sino que también permite su integración con otros conjuntos de datos y su reutilización en diversos contextos de investigación, planificación urbana y formulación de políticas públicas. Al aplicar los principios FAIR, se fomenta un entorno de ciencia abierta que promueve la transparencia, la reproducibilidad y la colaboración interdisciplinaria.

Se generaron tableros de control (*dashboards*) interactivos de visualización para cada una de *dashboards* las ciudades analizadas (Figs. 6 y 7), como un ejemplo práctico del aprovechamiento del conjunto de datos generado.



Considerando lo anterior, se puede destacar que al estar disponible el conjunto de datos en formato abierto, se habilita la posibilidad de realizar otros tipos de análisis geoespacial y aplicar técnicas más avanzadas, como las propias de la ciencia de datos, para abordar estudios más complejos y de mayor profundidad. Además, el uso de datos puntuales permite su

En relación con la representatividad de los datos de percepción de inseguridad y experiencias de acoso, es importante señalar que los hallazgos están directamente condicionados por la estrategia de recolección implementada en cada caso. En la ciudad de Toluca se organizaron mapatones presenciales en colaboración con usuarios del espacio público, lo que favoreció una mayor participación y permitió obtener un total de 1,819 puntos georreferenciados. En contraste, en Valencia se optó por una convocatoria abierta a través de redes sociales, la cual derivó en la recolección de 117 puntos. Esta disparidad en el volumen de datos sugiere que la estrategia participativa presencial —que incorpora dinámicas colectivas y acompañamiento metodológico— resulta más efectiva para incentivar la colaboración y registrar experiencias de manera más sistemática.

En el marco de iniciativas de CCG, el desarrollo de aplicativos web frente a aplicaciones móviles representa una estrategia particularmente adecuada para proyectos de bajo presupuesto. Esta elección no solo reduce los costos de mantenimiento y actualización, sino que también garantiza una participación más amplia y equitativa, al no depender de sistemas operativos específicos ni requerir la descarga de aplicaciones en los dispositivos de las usuarias. Desde una perspectiva geomática, resulta esencial priorizar herramientas accesibles que reconozcan el valor del conocimiento local aportado por las comunidades participantes y den pauta a la resolución de conflictos o problemáticas territoriales. Así, se fortalece la integración de saberes ciudadanos en los procesos de generación y análisis de información espacial, favoreciendo enfoques más inclusivos y socialmente relevantes.

Este proyecto fue apoyado a través de las Subvenciones a grupos de investigación consolidados AICO 2022 con número de expediente CIAICO/ 2021 292 y subvencionado por la Conselleria de Innovación, Universidades, Ciencia y Sociedad Digital de la Generalitat Valenciana.

De igual forma, fue financiado por los Proyectos de Investigación Científica para la Consolidación de Grupos de Investigación y los Estudios Avanzados, con enfoque

de inclusión e integridad en el Marco de los ODS 2024, de la Secretaría de Investigación y Estudios Avanzados de la Universidad Autónoma del Estado de México.

References

- ANQUELA, A.B., HERNANDEZ-ZETINA, S.L., VERDÚ-CANDELA, Á., CHIVA-GIL, J.V., MARTÍNEZ-MONTES, C., and MARTIN, Á., 2025. Integrated Datasets for analyses on potentially hazardous locations for women in Valencia, Dublin, San Francisco, and Toluca. Available: <https://zenodo.org/records/13892007> [6/30, 2025].
- BLASCO, J., TIRADO, F., and ROVIRA, J., 2021. Ciencia ciudadana y nuevas relaciones de poder y control. *Nómadas*, **55**, pp. 95-109. DOI: 10.30578/nomadas.n55a6
- FRAISL, D., SEE, L., CAMPBELL, J., DANIELSEN, F., and ANDRIANANDRASANA, H., 2023. The contributions of citizen science to the United Nations sustainable development goals and other international agreements and frameworks. *Citizen Science: Theory and Practice*, **8**(1), pp.1-6.
- FRAISL, D., SEE, L., FRITZ, S., HAKLAY, M., and MCCALLUM, I., 2025. Leveraging the collaborative power of AI and citizen science for sustainable development. *Nat Sustain*, **8**, pp. 125–132. DOI: 10.1038/s41893-024-01489-2
- FRITZ, S., SEE, L., CARLSON, T., HAKLAY, M., OLIVER, J., FRAISL, D., MONDARDINI, R., BROCKLEHURST, M., SHANLEY, L., SCHADE, S., WEHN, U., ABRATE, T., ANSTEE, J., ARNOLD, S., BILLOT, M., CAMPBELL, J., ESPEY, J., GOLD, M., HAGER, G., and WEST, S., 2019. Citizen science and the United Nations Sustainable Development Goals. *Nature Sustainability*, **2**(10), pp. 922–930. DOI: 10.1038/s41893-019-0390-3
- FUENZALIDA, M., BUZAI, G., MORENO, A., Y GARCÍA, A. 2015. Geografía, geotecnología y análisis espacial: tendencias, métodos y aplicaciones. Editorial Triángulo. Available: <https://repositorio.uam.es/handle/10486/668488> [6/30, 2025].
- GERTRUDIX, M., CARBONELL-ALCOCER, A., ROMERO-LUIS, J., SÁNCHEZ-ACEDO, A., and RIVAS-REBAQUE, B., 2024. Applying UX Principles to Innovate Citizen Science Platform Development: An Integrative Approach. En: Tareq Ahram y Waldemar Karwowski (eds) *Human Factors in Design, Engineering, and Computing. AHFE (2024) International Conference*. AHFE Open Access, 159
- GPFSDD, 2025. Global Partnership For Sustainable Development Data. Elijiendo e interactuando con los Datos Generados por los Usuarios. Available: https://www.data4sdgs.org/sites/default/files/file_uploads/Choosing%20and%20Engaging%20with%20CGD_The%20Guide_ES.pdf [6/30, 2025].
- HAKLAY, M., (2013). Citizen Science and Volunteered Geographic Information: Overview and Typology of Participation. En: Sui, D., Elwood, S., Goodchild, M. (eds) *Crowdsourcing Geographic Knowledge*. Springer, Dordrecht. DOI: 10.1007/978-94-007-4587-2_7
- HUANG, X., WANG, S., YANG, D., HU, T., CHEN, M., ZHANG, M., ZHANG, G., BILJECKI, F., LU, T., and ZOU, L., 2024. Crowdsourcing Geospatial Data for Earth and Human Observations: A Review. *J. Remote Sens*. Article 0105. DOI: 10.34133/remotesensing.0105
- KRAWCZYK, A., 2022. Proposal of Redefinition of the Terms Geomatics and Geoinformatics on the Basis of Terminological Postulates. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, **11**, 557. DOI: 10.3390/ijgi11110557
- SELMY, S., KUCHER, D., YANG, Y., and GARCÍA-NAVARRO, F., 2024. Geospatial Data: Acquisition, Applications, and Challenges. En R. M. Abdalla (Ed.), *Exploring remote sensing: Methods and applications*. IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.1006635
- UN-GGIM, 2020. Comité de expertos de las Naciones Unidas sobre la gestión de la información geoespacial global. Marco Integrado de Información Geoespacial: Parte 1 – Estrategia global (2.ª ed.). Available: https://ggim.un.org/UN-IGIF/documents/IGIF-SP_PARTE%201_ESTRATEGIA%20GLOBAL_SecundaEdicion_FINAL.pdf [6/30, 2025].

HARMONIZED 3D BUILDINGS SPATIAL DATABASE FOR SUSTAINABLE SMART CITIES

BASE DE DATOS ESPACIAL ARMONIZADA DE EDIFICIOS 3D PARA CIUDADES INTELIGENTES SOSTENIBLES

Rafael Sierra-Requena^{a, b, *}, José Carlos Martínez-Llario^b, Eloina Coll-Aliaga^b

^a University Regional Office of Directorate General for Cadastre, Ministry of Finance, Spain. , rasiere@upv.upvnet.es

^b ITACA Research Institute, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain. , jomarlla@upv.es; , ecoll@cgf.upv.es

How to cite: R. Sierra-Requena, J.C. Martínez-Llario, E. Coll-Aliaga. 2025. Harmonized 3D buildings spatial database for sustainable smart cities. En libro de actas: *Quinto Congreso en Ingeniería Geomática*. Valencia, 2 – 3 de Julio de 2025. <http://dx.doi.org/10.4995/CIGeo2025.2025.19913>

Abstract:

Sustainable smart city management integrates computer systems with a large volume of building-related data to manage urban issues such as public services, the environment, transportation, housing, industry or business, energy, security or health. This paper discusses the harmonization of geospatial buildings data with European geographic data (INSPIRE), crowdsourced data (OSM) and international standards for geographic information (ISO 19100). Furthermore, the proposed conceptual building schema includes the spatial components of height and elevation to store different types of 3D geometries depending on the spatial resolution of the geospatial data source (topography, LIDAR, photogrammetry or remote sensing). The objective is to provide an open spatial database of urban buildings linked to real estate data that ensures data quality, includes metadata information, enables spatial and alphanumeric analysis and improves interoperability with open digital vector formats (Geopackage, CityGML or IFC). In addition, this data schema for buildings can be implemented into Geographic Information Systems (GIS) linked to geospatial information on urban planning, property rights, demographics, postal addresses and cadastre to improve local governments.

Key words: Harmonization, 3D Buildings, PostGIS, INSPIRE, CityGML, Smart Cities

Resumen:

La gestión sostenible de las ciudades inteligentes integra sistemas informáticos con un gran volumen de datos relacionados con los edificios para gestionar cuestiones urbanas como los servicios públicos, el medio ambiente, el transporte, la vivienda, las industrias o los negocios, la energía, la seguridad o la salud. En este artículo se analiza la armonización de los datos geoespaciales de edificios con los datos geográficos europeos (INSPIRE), los datos colaborativos (OSM) y las normas geográficas internacionales (ISO 19100). Además, el esquema conceptual de edificios propuesto incluye los componentes espaciales de altura y elevación para almacenar diferentes tipos de geometrías 3D en función de la resolución espacial de la fuente de datos geoespaciales (topografía, LIDAR, fotogrametría o teledetección). El objetivo es proporcionar una base de datos espacial abierta de edificios urbanos enlazada a datos de inmuebles que garantice la calidad de los datos, incluya información de metadatos, permita el análisis espacial y alfanumérico y mejore la interoperabilidad con formatos vectoriales digitales abiertos (Geopackage, CityGML or IFC). Además, este esquema de datos sobre edificios puede implantarse en Sistemas de Información Geográfica (SIG) vinculados a información geoespacial sobre urbanismo, derechos de propiedad, demografía, direcciones postales y catastro para mejorar las administraciones locales.

Palabras clave: Armonización, Edificios 3D, PostGIS, INSPIRE, CityGML, Ciudades inteligentes

1. Introduction

Urban management in smart cities is carried out through geospatial data, which enables local governments to perform spatial analysis. Therefore, the integration of three-dimensional (3D) building geometries into Geographic Information Systems (GIS) has been used for many years in fields such as urban planning, transport or environmental management (Köninger and

Bartel 1998). In the last few years, smart city platforms have been linked to virtual 3D city models and their realistic representations, the so-called digital twins (Ruohomäki *et al.* 2018). These technological advancements are implemented in open governmental geospatial platforms to achieve the Sustainable Development Goals (SDGs) and to enhance the management of public resources.

* Corresponding Author: Rafael Sierra-Requena, rasiere@upv.upvnet.es

In particular, the digital representation of urban buildings in 3D has been the subject of continuous research and development over the past decades, especially for its application in virtual city models (Biljecki *et al.* 2015; Willenborg *et al.* 2017). These data have also gained significant importance through their association with Building Information Modelling (BIM) (Zhou *et al.* 2020). Although BIM models have traditionally been associated with the design, construction and maintenance of buildings, they are now increasingly being integrated with GIS (Wang *et al.* 2019).

In recent years, the implementation of vector tile web services has substantially improved the realistic virtual representation of buildings and the retrieval of associated information within 3D web mapping platforms. However, this research is primarily focused on the generation of three-dimensional building geometries from two-dimensional geospatial datasets in GIS and CAD formats, incorporating absolute elevation components through the analysis of classified LIDAR point clouds.

The source geospatial dataset is downloaded from the Spatial Data Infrastructure (SDI), and therefore the building information is standardized in accordance with the European Union (EU) INSPIRE Directive (Minghini *et al.* 2021), which classifies it as a high-value dataset under its recently adopted Regulation 2023/138. Indeed, some researchers (Roschlaub and Batscheider 2016) have already developed applications using this standardized and interoperable dataset.

Furthermore, a new buildings data model is proposed, harmonized with existing open standards for this information in the geospatial sector, such as CityGML, OpenStreetMap (OSM), or IFC, and enriched with additional related urban information to be used by smart city platforms.

In this way, the processed 3D building data can be stored in a relational database containing the harmonised spatial model and linked to other urban data sets from the public administration, such as the planning, population census or cadastre. In particular, linking the building dataset with alphanumeric urban real estate data is essential because it allows analysis of property, housing, taxation and public services.

The harmonised spatial database can be provided in a variety of open formats for exploitation in GIS, web mapping platforms or other IT city systems (Seto *et al.* 2023).

Finally, the research focuses on harmonizing existing building data with other city data models (Lei *et al.* 2023) and public administration information to implement a 3D spatial database that facilitates urban spatial analysis. The results obtained can be used for the initial development of smart cities and applied to urban management, such as planning, environment, disaster prevention, facilities and energy efficiency.

2. Methods and materials

2.1. Analysis of open data model for 3D Buildings

The methodology of this research is based on using official geospatial building datasets accessible from the INSPIRE SDI geoportal (EU 2025). There are currently 283 downloadable building datasets from 29 EU countries on the INSPIRE project web platforms, and in some cases 3D geometries are provided in GML format.

In addition, the experiment considered the 3D city spatial model, CityGML, proposed by the Open Geospatial Consortium (OGC), the geospatial industry standardisation organism. A large number of datasets in this format have been downloaded from official institutions. Other projects and developments based on this model were also reviewed, such as 3DCityDB, which implements the data in a spatial database, although it does not expand the information on buildings. The collaborative mapping platform OpenStreetMap (OSM) also adopts this model in a project called OSM Buildings (OpenStreetMap 2025; OSM_Buildings 2025), although in many cases its 3D geometries are sourced from open datasets such as INSPIRE and contain limited semantic information with issues of completeness.

The complexity of the 3D building spatial data model increases with more level of detail (LOD) grade concept on CityGML (Biljecki *et al.* 2016b), and Figure 1 visualizes some samples.

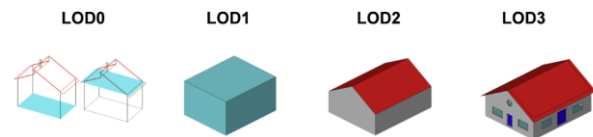


Figure 1: LODs on CityGML 3.0 specifications.

LOD0 represents the 2D building, LOD1 corresponds to the extruded building, LOD2 is the 3D modelled building and LOD4 is the model with interior building elements such as furniture. The IndoorGML schema has also been applied to this last case, which allows navigation inside the building (Lee 2020).

Finally, the standard BIM data model for buildings was reviewed, examining its geometric format and attributes, along with its applicability primarily at the highest levels of detail (LOD3–LOD4) for individual flats and ISO 19152 for Land Administration Model (LADM) in order to register rights and properties (Broekhuizen *et al.* 2025).

2.2. Design of new spatial data model for 3D buildings

Therefore, the starting data model for our research was the extended INSPIRE 3D Building schema (INSPIRE 2025), as it is already standardised according to international standards such as ISO 19100 and considers other urban spatial modelling schemas such as the CityGML 3.0 data model as shown in Figure 2.

However, to develop the new model, several general attributes were added to the building component at LOD1–LOD2, which allow for the geolocation of the building and link it to other schemes or datasets provided in INSPIRE (such as cadastral parcel, primary

postal address, locality name, population census code, city district, and electoral census). Other attributes were also added that allow the building to be classified as social, protected or historic.



Figure 2: Image from the INSPIRE Buildings specification for attributes comparison with the CityGML data model.

Additionally, further attributes describing the building construction were incorporated into the extended 2D model, referred to as "BuildingInfo." These attributes include, among others, the number of entrances, number of parking spaces, number of parking levels, number of storage rooms, number of commercial units, number of communal staircases, and number of fire escape staircases.

Moreover, attributes related to energy and utility services (such as water, electricity, gas, waste and internet) have also been included in the extended 2D model in accordance with the INSPIRE regulations. These attributes are intended to enable linkage with other public administration datasets. However, some of this information may need to be protected in the case of file exports for user downloads. The presence of a fibre optic internet connection is also recorded. In addition, attributes from other energy-related developments based on INSPIRE (GSC_Buildings 2011; Bachert *et al.* 2024) have been included.

In addition, the INSPIRE classification for 'other constructions' and 'facilities' has been included, although in many cases it will be difficult to extract a 3D component depending on the resolution of the mapping or lidar points.

The existing building attributes and values in the IFC model for BIM were reviewed and, as shown in Table 1, most of them are already covered in the INSPIRE model.

The following section, specifically Figure 3, sets out the attributes corresponding to other schemes and sources that are incorporated into the harmonised three-dimensional building model, with the aim of optimising

local government management. As evidenced in the analysis presented, the table shows the abbreviated name, type of information, government data source, use, and SDGs that may be related.

Table 1: Matching between IFC attribute (BuildingCommon) for building data and INSPIRE attributes.

IFC	INSPIRE
YearOfLastRefurbishment	dateOfRenovation
NumberOfStoreys	numeorOfFloorsAboveGround
ElevationOfTerrain	elevation
ElevationOfRefHeight	heightAboveGround
IsLandmarked	--
OccupancyType	currentUse

BUILDING extra attrib.	type data source	list value	source info	intended use	SDG sustainability
settlementName	census	no	national	administrative	3; 11; 12; 17
cityDistrict	census	no	local	administrative	3; 11; 12; 17
populationCensus	census	no	national	administrative	1; 3; 10; 11; 17
occupancy	census	no	local	administrative	1; 3; 10; 11; 17
electoralRoll	census	no	local	administrative	10; 11; 16; 17
numberOfElevators	industry	no	regional	energy; emergencies	9; 10; 11
numberOfStaircase	urban planning	no	local	emergencies	3; 11
accessibility	urban planning	yes	local	social; sustainability	11; 10
parkingSpaces	cadastral; urban plann	no	national; local	emergencies	9; 11; 12
parkingFloors	cadastral; urban plann	no	national	emergencies	7; 9; 11
storageUnits	cadastral; urban plann	no	national	emergencies	11; 12
fireEscape	cadastral; urban plann	yes	local	emergencies	11; 3
floorAvgHeight	urban planning	no	local	emergencies	11; 9
floorDescription	urban planning	no	local	emergencies	3; 7; 9; 11
materialStructure	urban planning	yes	local	energy; sustainability	3; 7; 9; 11; 12
roofType	industry	yes	regional; national	energy; sustainability	7; 9; 11; 13; 15
greenSpaces	industry	yes	local	sustainability	3; 11; 12; 13
indoorPool	industry	yes	local	energy; sustainability	6; 7; 11; 12
indoorParkSport	industry	yes	local	energy; sustainability	3; 11; 4; 10
efficiencySystems	industry	no	regional	energy; sustainability	7; 11; 12; 13
photovoltaicPotential	industry	no	regional; national	energy; sustainability	7; 9; 11; 13
energyProduction	industry	no	regional	energy; sustainability	7; 9; 11; 13
wasteManagement	environment	no	local	energy; sustainability	11; 12
waterManagement	urban planning	no	local	energy; sustainability	6; 11
connectivity	industry	yes	local	energy; sustainability	9; 11; 12; 17
districtHeatCool	industry	yes	regional	energy; sustainability	7; 11; 12; 13
historicBuilding	urban planning	yes	regional; national	heritage	11
protectedBuilding	urban planning	yes	local	heritage	11
socialBuilding	industry	no	regional	social; sustainability	11
commercialOffices	industry; administrativ	no	national; regional	industry	3; 7; 9; 11; 13

Figure 3: Extended attributes of the harmonised building data model with its use, typology and possible application for management in sustainable cities through SDGs.

The element 'dwelling' is added and existing attributes in the INSPIRE schema and the ISO 19152 - LADM standard are included (cadastral property code, land registry code, year_of_registration_of_property, use or activity licence code, last building licence code, year_of_last_building_licence, ceiling_height, floor_height_metres energy certificate, number_of_rooms, terrace, smart systems and efficiency rating). In our experiment, alphanumeric data were added to the property table of the Dirección General de Catastro (DGC) of the Spanish Ministry of Finance, which can be downloaded in a CAT (DGC 2022a) and FIN (DGC, 2022b) flat text format file with protected data for public administration. For example, the existing list of values for the attribute 'currentUse' is extended according to the typology of use of the property. In addition, the cadastral value and the reference value of the real estate will be included as protected data for public administrations.

Additionally, some research has been conducted on the georeferencing of apartments and offices in 3D, in accordance with the LADM (Vučić *et al.* 2024). The 3D building data model enables the management of building geometries in LOD3 based on the Spanish cadastral

exchange CAD format (FXCC), facilitating the precise geographical location of dwellings within a building. Furthermore, the geometric definition can be refined to LOD4 by incorporating construction documents and detailed plans of the dwellings' layouts.

Finally, the harmonised 3D model design of buildings was generated in a standardised format using the unified modeling language (UML), which will be useful for implementing the scheme in spatial databases.

2.3. Importing, processing and exporting 3D Building data

The experiment used the INSPIRE 2D building layers provided by the Directorate General for Cadaster of Spanish Ministry of Finance to the EU as a reference dataset.

This government agency already provides a 3D building map viewer in cadastral geoportal (Cadastral Electronic Site) as shown in Figure 4, which contains extruded geometries based on the number of floors attribute and identifies existing housing and its current use when the cadastral information system includes building layout plans (SEC 2025).



Figure 4: Image from the 3D Buildings map viewer on cadastral geoportal. It shows a selected dwelling geometry inside building geometry.

The import process shown in Figure 5 started after downloading the inputs, the 2D building layer from INSPIRE, the alphanumeric cadastral data from the Ministry of Finance and the LIDAR point cloud provided by the Ministry of Transport in the PNOA project for the test area.

Therefore, to obtain the 2D building data from INSPIRE, a geospatial process was used to ensure the spatial and topological quality of the geometries. A process was then developed to link alphanumeric cadastral data to INSPIRE geometries and complete the extended attributes in the building and property tables of spatial database.

Subsequently, a spatial process was developed for the purpose of assigning the elevation component to the 2D geometries. This was achieved by using the Lidar point clouds classified as buildings in the LAS and LAZ format files. In this way, 3D building geometries can be extracted with all the details contained in the INSPIRE BuildingParts layers. The lidar point cloud can optionally be imported into the spatial database and integrated as an auxiliary table in the harmonised building model.

However, other spatial utilities will need to be considered in order to incorporate these geographic information into the spatial database, as this could require a large amount of storage space.

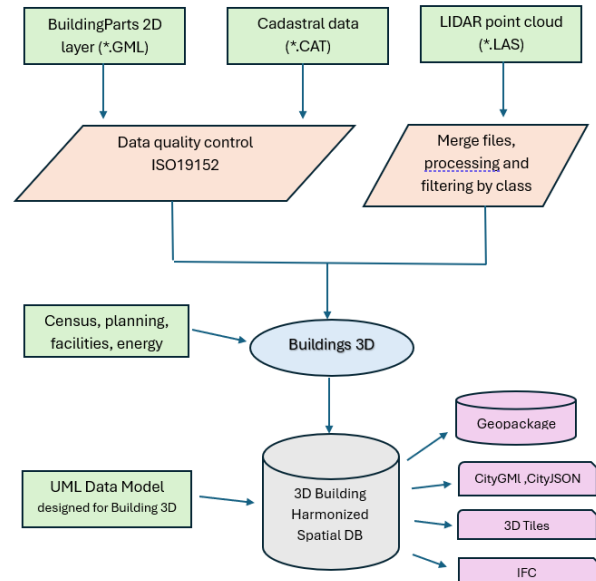


Figure 5: Image from the INSPIRE Buildings specification for attributes comparison with the CityGML data model.

Then, through spatial analysis, the necessary data are obtained from other data models (census, population, planning, services, etc.) to complete the new attributes proposed in the model.

The generated 3D building data (LOD1) were imported into a PostgreSQL database using the PostGIS spatial extension. To obtain building roofs (LOD2), there are existing developments in some Python libraries, although it is advisable to use high spatial resolution lidar point clouds.

There are currently commercial solutions on the geospatial market for generating exports between formats using ETL applications such as FME or commercial GIS such as ArcGIS, although in this case scripts developed in Python have been used. In particular, scripts have been created to export to CityJSON and CityGML files, as the data model is compatible and allows export in LOD2 format. Optionally, there are scripts to generate 3D tiles from a spatial database. Finally, the export process to IFC has also been tested using the Python library 'ifcopenshell'. However, to obtain a 'complete' IFC model, it would be necessary to use the digitised building plan images or CAD files contained in the cadastral administrative files.

However, exporting the building data in geopackage file (sqlite database) format provides the best performance as it allows spatial analysis in a GIS.

3. Results

The result of generating a new harmonised 3D data model for buildings was extended data elements from the current 3D Building INSPIRE UML design.

The harmonized spatial model incorporates attributes and values from GML, OSM, and IFC building models,

as shown in Figure 6. It also shows the addition of attributes from other government information sources that are useful for exploiting and analysing the information.



Figure 6: Extended feature type from INSPIRE “BuildingInfo” for harmonized 3D Building data model.

In addition, a new feature has been included that allows us to manage dwellings information and associate it geometrically for when geometries with LOD3-LOD4 detail levels are available and it shows in Figure 7. However, although these geometries have not yet been implemented, data can be exploited in alphanumeric form.



Figure 7: New feature type to include dwellings.

After the implementation of the UML model, an SQL script was generated to facilitate the deployment of the model within a spatial database. Figure 8 shows the spatial database design.



Figure 8: Image of the spatial data base design in accordance with the harmonised UML model for buildings.

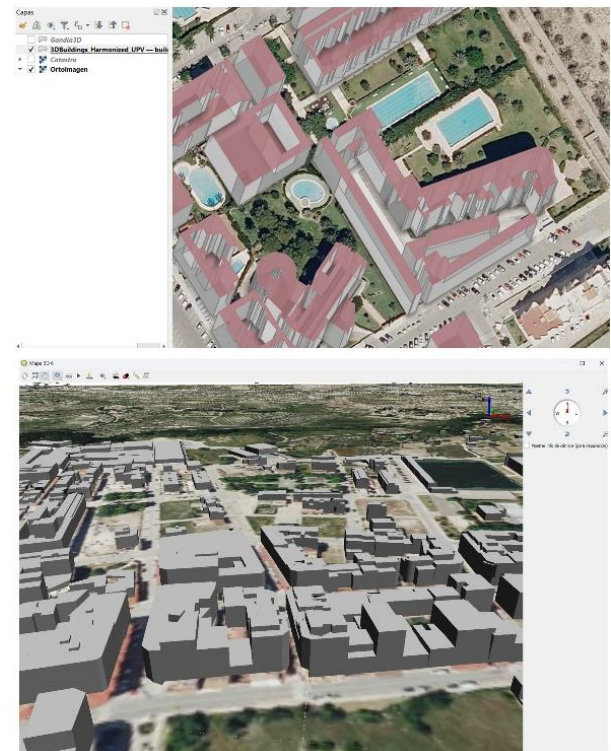


Figure 9: View of QGIS with 3D Buildings layers from geopackage file.

4. Discussion

The sustainable management of smart cities can be improved by integrating 3D building models into a GIS. However, building data must also include semantic information related to their physical or energy characteristics and the properties that comprise them. It is therefore essential that the GIS allows users to

implement any spatial analysis to geographically locate dwellings or real state by querying planning data, population census data, infrastructure data or service data. In addition, studies can be carried out to increase energy efficiency, ensure environmental quality, manage emergencies and improve transport.

The cited papers below show that there has been an increase in interest and research into city models (Yao *et al.* 2018), their applications (Willenborg *et al.* 2017) and the implementation of standards in geospatial city models such as CityGML (Lei *et al.* 2023), as well as the implementation of BIM standards and their integration with a GIS. Although a great 3D visualisation is not a priority in our project, it is important to generate a 3D model with less detail but greater positional accuracy.

This research focuses on applying the three-dimensional elevation component to existing building geometries in standardised spatial databases. The altimetry is provided by LIDAR point clouds. Some research, such as (Biljecki *et al.* 2017), confirm that the altimetry provided by point clouds is reliable. LIDAR, not the number of floors, improves the accuracy of 3D spatial analysis.

Therefore, a key factor is the implementation of methods to improve the classification of buildings provided in the LAS file (Ramiya *et al.* 2017), which is directly related to the increase in volume and density of points per m². In the case of the study, a national LIDAR coverage of 0.5 points/m² is available and has been used to generate 3D building data with a LOD2. A new national coverage with a density of 5 points/m² will soon be available. This higher density national LIDAR coverage will enable future work to automatically determine the geometric shape of roofs and construction details, as demonstrated in similar research (Cao *et al.* 2017), thereby enabling the generation of 3D building geometries at higher LOD2–LOD3 levels. However, some studies indicate that to produce 3D building models at LOD3–LOD4, it is necessary to apply photogrammetric methods using oblique aerial imagery with high spatial resolution.

However, it is essential to have LOD1 reference geometry with enough positional and semantic quality, as well as models with LOD2–LOD3 geometries with very good visual quality (Biljecki *et al.* 2016a). For this reason, the process starts with a data quality analysis before generating the 3D geometries. As can be seen

from the results, work needs to be done to detect omissions and to improve the positional and semantic geometric quality.

Furthermore, the new implementation of harmonised extended Building information in 3D improves access to and interoperability of urban information with other GIS applications and geospatial web maps. In fact, the European INSPIRE Directive is making progress in this respect to provide high quality spatial data sets (Minghini *et al.* 2021). This aligns with other studies (Cetl *et al.* 2023), that emphasize the importance of having access to semantic cadastral data to enhance the available information on buildings and dwellings. Specifically, the proposed harmonized 3D building model includes extended attributes and values, which provides the analytical strength of our harmonized data model.

5. Conclusion

This development of the proposed harmonized 3D building spatial model integrates high-quality geometric and semantic information, while the spatial data model allows for the integration of 3D geometries with higher levels of detail to provide a realistic representation of buildings within the urban environment. Therefore, the objective of this study is not the visualization of 3D buildings in virtual models, but rather to enable building data to support spatial analysis within GIS applications. For this reason, a harmonized data model has been developed that integrates official data from European public administrations, such as INSPIRE, as well as from national and local authorities.

The final results consist of 3D building data that will be accessible in open spatial database formats (PostGIS and GeoPackage), ensuring interoperability with any open-source or commercial GIS platform. This geospatial building information can be exported to other formats, such as CityGML, CityJSON, or IFC, which support visualization and navigation in web-based map viewers. However, this research serves as a starting point for providing harmonized 3D building information integrated into local government and municipal management systems. In the near future, this dataset could form part of smart city platforms and be linked to other datasets related to the environment or transport to perform spatial analyses that improve the management of urban areas.

References

- BACHERT, C., LEÓN-SÁNCHEZ, C., KUTZNER, T., and AGUGIARO, G., 2024. Mapping the CityGML Energy ADE to CityGML 3.0 Using a Model-Driven Approach. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, **13**(4), 121. DOI: 10.3390/ijgi13040121.
- BILJECKI, F., STOTER, J., LEDOUX, H., ZLATANOVA, S., and ÇÖLTEKIN, A., 2015. Applications of 3D city models: State of the art review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, **4**(4), pp. 2842–2889. DOI: 10.3390/ijgi4042842.
- BILJECKI, F., LEDOUX, H., STOTER, J., and VOSSELMAN, G., 2016a. The variants of an LOD of a 3D building model and their influence on spatial analyses. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **116**, pp. 42–54. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.03.003.
- BILJECKI, F., LEDOUX, H., and STOTER, J., 2016b. An improved LOD specification for 3D building models. *Computers, Environment and Urban Systems*, **59**, pp. 25–37. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2016.04.005.
- BILJECKI, F., LEDOUX, H., and STOTER, J., 2017. Generating 3D city models without elevation data. *Computers, Environment and Urban Systems*, **64**, pp. 1–18. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2017.01.001.

- BROEKHUIZEN, M., KALOGIANNI, E., and OOSTEROM, P. VAN, 2025. BIM/IFC as input for registering apartment rights in a 3D Land Administration Systems – A prototype webservice. *Land Use Policy*, **148**, p. 107368. DOI: 10.1016/j.landusepol.2024.107368.
- CAO, R., ZHANG, Y., LIU, X., and ZHAO, Z., 2017. 3D building roof reconstruction from airborne LiDAR point clouds: A framework based on a spatial database. *International Journal of Geographical Information Science*, **31**(7), pp. 1359–1380. DOI: 10.1080/13658816.2017.1301456
- CETL, V., ŠAMANOVIĆ, S., BJELOTOMIĆ ORŠULIĆ, O., and LISEC, A., 2023. Building a cadastral map of Europe through the INSPIRE and other related initiatives. *Land*, **12**(7), 1462. DOI: 10.3390/land12071462.
- DGC, 2022a. Portal de la Dirección General del Catastro. Especificación completa fichero CAT en formato PDF. Available: https://www.catastro.hacienda.gob.es/documentos/formatos_intercambio/catastro_fin_cat_2006.pdf [6/30, 2025].
- DGC, 2022b. Portal de la Dirección General del Catastro. Especificación completa fichero FIN en formato PDF. Available: https://www.catastro.hacienda.gob.es/documentos/formatos_intercambio/catastro_fin_2006.pdf [6/30, 2025].
- EU, 2025. INSPIRE Geoportal, European Commission, official website. Access to the building data set in the INSPIRE SDI. Available: <https://inspire-geoportal.ec.europa.eu/srv/eng/catalog.search#/overview?view=themeOverview&theme=bu> [6/30, 2025].
- GSC_BUILDINGS, 2011. WeTransform - GeoSmartCity Buildings 2D Energy. Available: <https://www.epsilon-italia.it/public/geosmartcity/schemas/gsc-bu2d-energy/2.1/HTML/> [6/30, 2025].
- INSPIRE, T., 2024. D2.8.III.2 Data Specification on Buildings – Technical Guidelines. Available: https://inspire-mif.github.io/technical-guidelines/data/bu/dataspecification_bu.pdf [6/30, 2025].
- KÖNINGER, A., and BARTEL, S., 1998. 3d-Gis for Urban Purposes. *Geoinformatica*, **2**(1), pp. 79–103. DOI: 10.1023/A:1009797106866.
- LEE, J., LI, K. J., ZLATANOVA, S., KOLBE, T. H., NAGEL, C., BECKER, TSISI, Z., and H.Y. KANG, 2020. OGC® IndoorGML, Version 1.1.L. Available: <https://docs.ogc.org/is/19-011r4/19-011r4.html> [6/30, 2025].
- LEI, B., STOUFFS, R., and BILJECKI, F., 2023. Assessing and benchmarking 3D city models. *International Journal of Geographical Information Science*, **37**(4), pp. 788–809. DOI:10.1080/13658816.2022.2140808.
- MINGHINI, M., CETL, V., KOTSEV, A., TOMAS, R., and LUTZ, M., 2021. INSPIRE: The entry point to Europe's big geospatial data infrastructure. In *Handbook of big geospatial data* (pp. 619–641). Cham: Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-030-55462-0_24
- OPENSTREETMAP, 2025. Key:building - OpenStreetMap Wiki. OSM data mode for Buildings. Available: <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Key:building> [6/30, 2025].
- OSM Buildings, 2025. Virtual 3D Map of OSM Buildings. Valencia (ES) • OSM Buildings. Available: <https://osmbuildings.org/?lat=39.46734&lon=-0.37617&zoom=16.2&tilt=30> [6/30, 2025].
- [RAMIYA, A.M., NIDAMANURI, R.R., and KRISHNAN, R., 2017. Segmentation based building detection approach from LiDAR point cloud. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, **20**(1), pp. 71–77. DOI: 10.1016/j.ejrs.2016.04.001.
- ROSCHLAUB, R., and BATSCHEIDER, J., 2016. An Inspire-Konform 3D building model of Bavaria using cadastre information, LiDAR and image matching. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, **41**(July), pp. 747–754. DOI: 10.5194/isprsarchives-XLI-B4-747-2016.
- RUOHOMÄKI, T., AIRAKSINEN, E., HUUSKA, P., KESÄNIEMI, O., MARTIKKA, M., and SUOMISTO, J., 2018. Smart city platform enabling digital twin. In *2018 International Conference on Intelligent Systems (IS)* (pp. 155–161). IEEE. DOI: 10.1109/IS.2018.8710517
- SEC, 2025. Sede Electrónica del Catastro - Visor 3D. Visor Web de Edificios 2.5D Catastro España. Available: <https://www1.sedecatastro.gob.es/Cartografia/FXCC/Visor3D.aspx?del=46&mun=900&refcat=3245101YJ2734E0001KY&final=> [6/30, 2025].
- SETO, T., FURUHASHI, T., and UCHIYAMA, Y., 2023. Role of 3d City Model Data as Open Digital Commons: a Case Study of Openness in JAPAN'S Digital Twin" PROJECT PLATEAU". *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **48**, pp. 201–208.
- VUČIĆ, N., VRANIĆ, S., SUTHERLAND, M., and VAN OOSTEROM, P., 2024. Registration of apartments and office spaces in 3D land administration—A case study in Croatia. *Land Use Policy*, **142**, pp. 107187. DOI: 10.1016/j.landusepol.2024.107187
- WANG, H., PAN, Y., and LUO, X., 2019. Integration of BIM and GIS in sustainable built environment: A review and bibliometric análisis. *Automation in Construction*, **103**(March), pp. 41–52. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.03.005

- WILLENBORG, B., SINDRAM, M., and KOLBE, T.H., 2017. Applications of 3D city models for a better understanding of the built environment. *Trends in spatial analysis and modelling: decision-support and planning strategies*, pp. 167-191.
- YAO, Z., NAGEL, C., KUNDE, F., HUDRA, G., WILLKOMM, P., DONAUBAUER, A., ... and KOLBE, T. H., 2018. 3DCityDB-a 3D geodatabase solution for the management, analysis, and visualization of semantic 3D city models based on CityGML. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, **3**(1), pp. 1-26. DOI: 10.1186/s40965-018-0046-7
- ZHOU, Y.W., HU, Z.Z., LIN, J.R., and ZHANG, J.P., 2020. A review on 3D spatial data analytics for building information models. *Archives of Computational Methods in Engineering*, **27**(5), pp. 1449-1463. DOI: 10.1007/s11831-019-09356-6

TÉCNICAS DE ANÁLISIS ESPACIAL EN EL ESTUDIO DE DELITOS: ESTADO DEL ARTE

SPATIAL ANALYSIS TECHNIQUES IN CRIME STUDIES: STATE OF THE ART

Yenny Espinosa-Gómez^{a, b, *}, Antonio Vázquez-Hoehne^a

^a Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartográfica, Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, Campus Sur, A-3, Km 7, 28031 Madrid, España. , yenny.espinosa@alumnos.upm.es; , antonio.vazquez.hoehne@upm.es

^b Ingeniería Catastral y Geodesia, Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Sede Calle 40, KR 8 40 - 62, 110231 Bogotá, Colombia. yespinosa@udistrital.edu.co

How to cite: Y. Espinosa-Gómez y A. Vázquez-Hoehne. 2025. Técnicas de análisis espacial en el estudio de delitos: Estado del arte. En libro de actas: *Quinto Congreso en Ingeniería Geomática*. Valencia, 2 – 3 de Julio de 2025. <http://dx.doi.org/10.4995/CIGeo2025.2025.19874>

Resumen:

Este artículo de revisión se centra en el marco conceptual de estudios para la comprensión de delitos utilizando técnicas de análisis espacial como la Regresión Geográficamente Ponderada (GWR), la Regresión Geográfica y Temporalmente Ponderada (GTWR), entre otros. El objetivo es proporcionar una comprensión integral de estas metodologías y su relevancia para explorar patrones geográficos y temporales de delitos. Además, se realiza una revisión del estado del arte y de las aplicaciones prácticas de estas técnicas en el análisis de tendencias y patrones espaciales de hurtos y homicidios en contextos geográficos de algunos países del mundo. Se examinan estudios empíricos de países como Nigeria, México, Brasil, Colombia, El Salvador e Indonesia, para comprender sus enfoques y hallazgos, que proporcionen un marco conceptual y referencial para un estudio de delitos de hurto y homicidio en Colombia. Los hallazgos destacan el potencial del análisis espacial para revelar la influencia de factores socioeconómicos, demográficos y geográficos en la distribución espacial de los delitos. En particular, la aplicación de GWR y GTWR permite explorar relaciones localizadas entre estas variables, mejorando la comprensión de cómo los patrones delictivos varían según los diferentes contextos. Esta revisión contribuye al campo de investigación al sintetizar conocimientos y técnicas sobre el análisis espacial y su aplicación en estudios delictivos, ofreciendo perspectivas que respaldan la toma de decisiones basada en datos y su tratamiento, con el propósito de que las autoridades competentes tengan elementos para la gestión de la seguridad pública y la planificación urbana de las regiones.

Palabras clave: Geomática, Delitos, Análisis Espacial, Patrones geográficos, GWR, GTWR, Planificación urbana

Abstract:

This review article focuses on the conceptual framework of studies aimed at understanding crimes using spatial analysis techniques such as Geographically Weighted Regression (GWR) and Geographically and Temporally Weighted Regression (GTWR), among others. The objective is to provide a comprehensive understanding of these methodologies and their relevance in exploring the geographic and temporal patterns of crimes. Furthermore, a review of the state of the art and practical applications of these techniques in analyzing trends and spatial patterns of thefts and homicides in various geographical contexts worldwide is presented. Empirical studies from countries such as Nigeria, Mexico, Brazil, Colombia, El Salvador, and Indonesia are examined to understand their approaches and findings, providing a conceptual and referential framework for a study on theft and homicide crimes in Colombia. The findings highlight the potential of spatial analysis to reveal the influence of socioeconomic, demographic, and geographic factors on the spatial distribution of crimes. In particular, the application of GWR and GTWR allows for the exploration of localized relationships among these variables, enhancing the understanding of how criminal patterns vary across different contexts. This review contributes to the research field by synthesizing knowledge and techniques on spatial analysis and its application in crime studies, offering perspectives that support data-driven decision-making and its treatment, enabling authorities to enhance public safety management and urban planning in the regions.

Key words: Geomatics, Crimes, Spatial Analysis, Geographic Patterns, GWR, GTWR, Urban Planning

* Corresponding Author: Yenny Espinosa-Gómez, yenny.espinosa@alumnos.upm.es, yespinosa@udistrital.edu.co

1. Introducción

En las últimas décadas, el análisis del crimen ha incorporado herramientas espaciales que permiten comprender con mayor precisión la relación entre delito y territorio. A diferencia de los enfoques centrados únicamente en factores individuales, las perspectivas espaciales reconocen al espacio como una dimensión activa en la dinámica delictiva. Este giro ha sido impulsado por el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y técnicas estadísticas como la Regresión Geográficamente Ponderada (GWR) y su extensión espaciotemporal (GTWR), que facilitan el análisis localizado de la criminalidad y sus vínculos con factores socioeconómicos, demográficos y ambientales.

Estas metodologías han demostrado ser efectivas para identificar clústeres delictivos, analizar corredores de violencia y modelar la variabilidad espacial y temporal del crimen. Factores como la pobreza, el desempleo, el rezago educativo, la urbanización acelerada e incluso el clima extremo han sido señalados como condicionantes clave de delitos como el hurto o el homicidio. El presente artículo revisa el estado del arte sobre el uso de técnicas de análisis espacial en el estudio del crimen, organizando la discusión en torno a un marco conceptual, aportes teóricos y metodológicos, principales técnicas empleadas y aplicaciones empíricas en países como Nigeria, México, Brasil, Colombia, El Salvador e Indonesia. Finalmente, se destacan hallazgos clave y recomendaciones que evidencian el potencial del análisis espacial para orientar políticas públicas diferenciadas de seguridad, con énfasis en su relevancia para el contexto colombiano y para futuras investigaciones territoriales.

2. Criminología y Delito

La criminología es una disciplina científica que estudia el crimen, el comportamiento delictivo, sus causas y consecuencias, así como los mecanismos de prevención y control del delito. Según Rodríguez-Manzanera (2003), la criminología es una ciencia empírica e interdisciplinaria que se ocupa del estudio del delito, del delincuente, de la víctima y del control social del comportamiento delictivo, con el fin de suministrar información válida sobre su génesis y dinámica, así como sobre programas de prevención y estrategias de intervención.

El crimen, por su parte, ha sido considerado un fenómeno inherente a la sociedad. Desde una perspectiva sociológica, Durkheim afirmó que el delito es un fenómeno normal dentro de cualquier sociedad y que incluso en comunidades compuestas por individuos moralmente perfectos seguiría existiendo crimen (Morillas-Fernández 2010). Esta visión destaca que el crimen no solo depende de factores individuales, sino que está influenciado por estructuras sociales, económicas y culturales.

En el contexto jurídico colombiano, el delito se define como una conducta atípica, antijurídica y culpable, así el Código Penal de Colombia (Ley 599 de 2000) establece que la conducta punible puede ser realizada por acción o por omisión. Es decir, un delito puede cometerse tanto mediante una acción directa como por la falta de una acción cuando exista un deber jurídico de actuar. Sin embargo, la criminología amplía este concepto al

considerar también conductas que, aunque no estén penalizadas, pueden ser socialmente dañinas, como el abuso de poder o ciertas formas de violencia estructural (Buil-Gil 2016).

2.1. Criminología Espacial

La criminología espacial es una rama de la criminología que estudia la distribución geográfica del crimen y la influencia de las características del entorno en su ocurrencia. Según Buil-Gil (2016), la criminología contemporánea ha evolucionado para incluir enfoques analíticos que consideran el espacio como una variable fundamental en el estudio de la delincuencia.

Esta disciplina utiliza herramientas como los SIG para modelar patrones delictivos y analizar la relación entre factores socioeconómicos, demográficos y geográficos con la distribución del crimen. También emplea técnicas de análisis espacial, la ciencia de la información geográfica y técnicas de estadística espacial como lo son la GWR y la GTWR que permiten un análisis localizado de las dinámicas delictivas, facilitando estrategias de prevención más precisas y basadas en evidencia empírica (Rodríguez-Manzanera 2003). Estas técnicas, como la GWR, se centran en el análisis de datos que poseen componentes espaciales y, en el caso de la GTWR, también temporales.

El análisis espacial del crimen ha demostrado su utilidad en estudios realizados en distintos países, como México, Brasil y Colombia, donde se ha evidenciado que los patrones delictivos no son aleatorios, sino que siguen lógicas espaciales y temporales específicas. Estos hallazgos han permitido a los gobiernos diseñar algunas estrategias de seguridad más eficientes y orientar mejor la asignación de recursos en la lucha contra la criminalidad (Rodríguez-Manzanera 2003).

3. Aportes teóricos y metodológicos desde la geografía del delito

Diversos autores han abordado el análisis espacial del delito desde enfoques teóricos, metodológicos y críticos que permiten comprender cómo se produce, representa y gestiona la criminalidad en el territorio. A continuación, se presentan algunas contribuciones académicas que han nutrido el campo de la geografía del crimen, con énfasis en el uso de los SIG, la construcción de mapas delictivos, y las implicaciones sociales y políticas derivadas de estas prácticas analíticas.

3.1. Crítica al uso reduccionista de la cartografía del delito

Esteller (2014) plantea una crítica profunda al uso instrumental de los mapas del delito, utilizados comúnmente como dispositivos técnicos sin suficiente problematización conceptual. Desde su enfoque, la cartografía criminal se ha empleado para representar la concentración de hechos delictivos sin considerar el contexto histórico, social y económico en el que estos se producen. Esta forma de representación, afirma el autor, corre el riesgo de convertirse en una herramienta de control social que refuerza la estigmatización territorial y legitima intervenciones selectivas en ciertos barrios o comunidades. El autor sostiene que los SIG, si bien son valiosos, deben integrarse con enfoques cualitativos y

críticos que aborden las dimensiones simbólicas y estructurales de la violencia urbana.

3.2. Diversidad de enfoques en la geografía del crimen

Hernando (2006a) realiza un recorrido histórico y epistemológico por la evolución de la geografía del crimen, destacando la transición desde modelos ecológicos y cuantitativos hacia enfoques más eclécticos y multidisciplinarios. En su análisis, identifica cuatro grandes corrientes: la tradición ecológica influenciada por la Escuela de Chicago, las corrientes críticas radicales que cuestionan el uso acrítico de las estadísticas oficiales, las perspectivas liberal-reformistas que incorporan indicadores de calidad de vida, y las aproximaciones emergentes que integran temas como el miedo al delito, el género y el terrorismo. El autor resalta que el eclecticismo en este campo no debe verse como una debilidad teórica, sino como una oportunidad para abordar la complejidad del fenómeno delictivo desde múltiples dimensiones espaciales y sociales (Hernando 2006a).

3.3. Geografía crítica y análisis multiescalar de la violencia urbana

Desde otra perspectiva, Hernando (2006b) propone un enfoque multiescalar que considera tanto las dinámicas microterritoriales como las estructuras macroespaciales en la explicación del crimen urbano. Su propuesta teórica se basa en la geografía crítica y enfatiza que el delito es un fenómeno territorializado, vinculado a procesos como la segregación, la precarización de la vivienda y la configuración del espacio público. El autor subraya la utilidad de los SIG y de técnicas como los mapas de calor y la georreferenciación, no como fines en sí mismos, sino como herramientas que deben estar al servicio de diagnósticos contextuales, participativos y políticamente responsables. Las conclusiones del texto advierten que los mapas del delito pueden reforzar estereotipos si no se acompañan de interpretaciones estructurales que consideren la producción social del espacio (Hernando 2006b).

3.4. Aportes metodológicos desde los mapas delincuenciales

Vázquez-González and Soto-Urpina (2013) contribuyen al debate metodológico diferenciando entre el “mapa del delito” y el “mapa delincencial”. Mientras que el primero suele ser meramente descriptivo, el segundo permite articular el análisis del crimen con bases de datos sociodemográficas, indicadores de movilidad y variables urbanísticas. En este sentido, el mapa delincencial se convierte en una herramienta estratégica, explicativa y operativa que permite diseñar políticas de seguridad más focalizadas y eficientes. El proceso metodológico propuesto por los autores abarca desde la recolección y limpieza de datos hasta la representación visual y evaluación de hipótesis. Además, advierten sobre los posibles efectos negativos del uso de esta herramienta, como la estigmatización territorial o el uso inadecuado por parte de actores privados o estatales (Vázquez-González and Soto-Urpina 2013).

3.5. Hacia un modelo territorial crítico del análisis del crimen

El trabajo de Fraile and Bonastra (2011) plantea una propuesta innovadora para diseñar un modelo de análisis territorial del delito. Utilizando datos empíricos de la ciudad de Lérida y técnicas SIG como el método Kernel, los autores clasifican los delitos en tres categorías: estructurales, coyunturales y difusos. Esta tipología permite entender cómo ciertas formas delictivas se asocian con la morfología urbana, los flujos de personas y la funcionalidad de determinados espacios. En sus conclusiones, los autores advierten contra la “lógica actuarial” de gestión del riesgo que, al centrarse en la acumulación de datos y la predicción de delitos, puede invisibilizar las causas estructurales de la criminalidad y reforzar dinámicas de exclusión. Por tanto, proponen un modelo analítico que incorpore tanto los imaginarios sociales como las prácticas institucionales y las experiencias vividas del territorio (Fraile and Bonastra 2011).

4. Técnicas de Análisis Espacial orientadas al estudio del Crimen

El análisis espacial se ha consolidado como una herramienta clave en el estudio de la criminalidad al permitir detectar patrones territoriales y modelar la relación entre delitos y variables socioeconómicas o urbanísticas. Entre las técnicas más relevantes se encuentran la GWR y su extensión espacio-temporal, las cuales superan las limitaciones de los modelos globales al capturar variaciones locales y temporales en los fenómenos analizados (Fotheringham *et al.* 2002; Huang *et al.* 2010).

La GWR permite estimar coeficientes de regresión locales al ponderar las observaciones según su proximidad geográfica, reconociendo que las relaciones entre variables no son homogéneas en todo el territorio. Este enfoque ha sido útil en contextos urbanos complejos donde factores como la estructura vial o el entorno físico influyen en fenómenos como los precios inmobiliarios (Charlton *et al.* 2007; Lu *et al.* 2014), y tiene potencial de aplicación en estudios delictivos. Por su parte, la GTWR incorpora también la dimensión temporal, lo cual permite analizar dinámicas delictivas que varían en distintas épocas del año o tras eventos sociales específicos.

Diversos estudios han demostrado la eficacia de estas técnicas frente a modelos globales. Por ejemplo, en análisis de precios de vivienda, la GTWR ha logrado reducir errores de predicción en más del 40% (Huang *et al.* 2010). En el ámbito criminológico, estas metodologías permiten analizar la influencia diferenciada de variables como pobreza, densidad urbana o clima sobre el delito en distintas zonas y momentos. Asimismo, se ha señalado la relevancia de utilizar métricas de distancia más realistas, como el tiempo de viaje o las redes viales, para mejorar la precisión de los modelos espaciales en entornos urbanos (Lu *et al.* 2014; Chen *et al.* 2022).

4.1. Regresión Geográficamente Ponderada

La Regresión Geográficamente Ponderada (GWR, por sus siglas en inglés) es un método estadístico que

extiende la regresión lineal tradicional al permitir que los coeficientes del modelo varíen espacialmente en lugar de asumir una relación global uniforme entre las variables explicativas y la variable dependiente. Este enfoque es particularmente útil en el análisis de datos espaciales, donde la relación entre variables puede cambiar de una ubicación a otra debido a factores geográficos, socioeconómicos o ambientales (Fotheringham *et al.* 2002).

Matemáticamente, la GWR se expresa como en Ec. (1):

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \epsilon_i \quad (1)$$

donde y_i es la variable dependiente en la ubicación i , x_{ik} representa las variables independientes, $\beta_k(u_i, v_i)$ son los coeficientes que varían según la ubicación geográfica dada por (u_i, v_i) , y ϵ_i es el término de error (Fotheringham *et al.* 2002).

Uno de los elementos clave de la GWR es la asignación de pesos espaciales a las observaciones en función de su proximidad al punto de interés. A diferencia de los modelos de regresión tradicionales, donde se asume que cada observación tiene el mismo peso, la GWR pondera las observaciones utilizando una función kernel que asigna mayor peso a los datos más cercanos y menor peso a los datos más alejados. Esta ponderación se realiza comúnmente con funciones como la Gaussiana o la bicuadrada (Lu *et al.* 2014).

4.1.1. Algunas aplicaciones de la GWR

La GWR se ha aplicado con éxito en diversos campos de estudio. En geografía urbana, se ha utilizado para analizar la influencia de factores como la proximidad a infraestructuras en los valores de propiedad inmobiliaria, revelando cómo la relación entre precios y ubicación varía dentro de una ciudad (Huang *et al.* 2010). En epidemiología, ha sido empleada para modelar la incidencia de enfermedades en función de variables ambientales y socioeconómicas, permitiendo identificar áreas con riesgos diferenciados. En ciencias ambientales, ha ayudado a evaluar la distribución espacial de contaminantes en el aire y su correlación con variables meteorológicas y urbanas (Fotheringham *et al.* 2002).

En el análisis delictivo, la GWR ha demostrado ser una herramienta clave para entender cómo los factores sociales y económicos influyen en la distribución espacial del crimen. Estudios recientes han utilizado este enfoque para modelar la relación entre la actividad delictiva y variables como la densidad poblacional, los ingresos y la proximidad a áreas comerciales, encontrando que estas relaciones varían significativamente entre diferentes sectores de una misma ciudad (Fotheringham *et al.* 2015).

4.2. Regresión Geográficamente y Temporalmente Ponderada

La Regresión Geográficamente y Temporalmente Ponderada (GTWR, por sus siglas en inglés) es una extensión de la GWR que incorpora tanto las dimensiones espaciales como temporales en el análisis

de datos. Mientras que la GWR permite que los coeficientes de regresión varíen según la ubicación geográfica, la GTWR añade la posibilidad de que estos coeficientes también fluctúen a lo largo del tiempo, proporcionando una comprensión más detallada de fenómenos cuya naturaleza cambia en ambas dimensiones.

Matemáticamente, la GTWR se representa como en la Ec. (2):

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i, t_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i, t_i) x_{ik} + \epsilon_i \quad (2)$$

donde y_i es la variable dependiente en la ubicación (u_i, v_i) y en el tiempo t_i ; x_{ik} son las variables independientes; $\beta_k(u_i, v_i, t_i)$ son los coeficientes que varían espacial y temporalmente; y ϵ_i es el término de error. Esta formulación permite capturar la heterogeneidad espacial y temporal en las relaciones entre variables, lo que es especialmente útil en contextos donde estas relaciones no son estacionarias ni en el espacio ni en el tiempo (Huang *et al.* 2010).

La GTWR utiliza matrices de ponderación que integran información espacial y temporal para reflejar la influencia de observaciones cercanas en el espacio y en el tiempo. Esto se logra mediante funciones kernel que asignan pesos mayores a las observaciones más próximas en ambas dimensiones, permitiendo que el modelo se adapte a variaciones locales y temporales en los datos (Huang *et al.* 2010).

La elección del ancho de banda en la GTWR es crucial y puede determinarse utilizando criterios como la validación cruzada o el criterio de información de Akaike corregido (AICc). Un ancho de banda adecuado garantiza que el modelo capture eficazmente las variaciones espaciales y temporales sin sobreajustar ruidos o anomalías en los datos (Huang *et al.* 2010).

4.2.1. Algunas aplicaciones de la GTWR

La aplicación de la GTWR ha demostrado ser efectiva en diversos campos. Por ejemplo, en el estudio de precios de viviendas, se ha utilizado para analizar cómo factores estructurales y ambientales influyen en los precios de oferta en diferentes momentos y lugares, permitiendo identificar externalidades localizadas y calcular distancias no euclidianas que afectan el valor de las propiedades (Sora-Díaz and Molina-Gómez 2011). Además, en el análisis de la calidad del aire, la GTWR ha sido empleada para estimar concentraciones de contaminantes atmosféricos, integrando datos satelitales y mediciones en estaciones terrestres, lo que ha permitido obtener estimaciones más precisas y detalladas de la distribución espacial y temporal de dichos contaminantes (Li *et al.*, 2020).

4.3. Otras técnicas espaciales aplicadas al análisis del delito

Además de las técnicas de regresión geográficamente ponderada y su extensión espaciotemporal, existen otras metodologías que han sido aplicadas con éxito en el análisis espacial del delito. Estas herramientas ofrecen diferentes enfoques para abordar la distribución geográfica de los delitos y permiten explorar relaciones espaciales desde perspectivas tanto estadísticas como

cartográficas, complementando los resultados obtenidos por modelos de regresión local.

Una de estas metodologías es el análisis de autocorrelación espacial, particularmente el índice de Moran Global y el análisis de autocorrelación local (LISA), los cuales permiten identificar clústeres espaciales significativos de delitos y su persistencia en el territorio. Estas técnicas han sido empleadas, por ejemplo, en estudios sobre violencia y criminalidad en ciudades brasileñas, donde se ha evidenciado la existencia de agrupaciones espaciales de homicidios y su asociación con condiciones socioeconómicas desfavorables (Silva *et al.* 2020).

Asimismo, algunos estudios han aplicado modelos de regresión lineal múltiple (RLM) como línea base para comparar los resultados obtenidos con GWR. Este enfoque permite determinar la capacidad explicativa de las variables independientes a nivel global, antes de considerar variaciones locales. En el contexto colombiano, López-Herrera *et al.* (2019) realizaron este tipo de análisis al evaluar la incidencia del hurto en Bogotá, destacando la utilidad de estos modelos para establecer relaciones iniciales entre las variables y justificar el uso posterior de técnicas más avanzadas como GWR.

Otra técnica relevante es el uso de modelos autorregresivos condicionales (CAR), comúnmente empleados en análisis de datos espaciales agregados. En Nigeria, Adeyemi *et al.* (2020) aplicaron este tipo de modelo para analizar la distribución espacial de homicidios a nivel estatal, lo que permitió incorporar efectos espaciales correlacionados y obtener inferencias más precisas en contextos donde los datos presentan dependencia espacial estructurada.

También, se destaca la aplicación de modelos bayesianos espacio-temporales, como los utilizados en El Salvador por Carcach (2015), quien analizó la variación mensual de homicidios a través de modelos jerárquicos que incorporan tanto la dimensión espacial como la temporal. Estos enfoques permiten una estimación más robusta en presencia de heterogeneidad y baja frecuencia de eventos, lo cual es particularmente útil para el análisis del crimen en regiones con alta variabilidad.

Estas técnicas, aunque no descritas con el mismo nivel de profundidad que GWR y GTWR en este artículo, forman parte del conjunto de herramientas metodológicas aplicadas en los estudios empíricos revisados en la Sección 5. Su inclusión permite dar cuenta de la diversidad de enfoques utilizados para abordar la relación entre el espacio y el delito, subrayando la necesidad de una perspectiva metodológica plural y adaptada a cada contexto territorial.

4.4. Herramientas informáticas utilizadas en este tipo de análisis

En el análisis espacial del crimen, diversos estudios han demostrado una tendencia consolidada en el uso de herramientas informáticas especializadas que permiten modelar, visualizar y explorar patrones espaciales de comportamiento delictivo. Entre los softwares más utilizados se encuentran ArcGIS y QGIS para la

elaboración de mapas temáticos y análisis de autocorrelación espacial; GWR4 y MGWR para la implementación de modelos de regresión geográficamente ponderada; R, por su versatilidad y librerías específicas para estadística espacial y modelado bayesiano; y WinBUGS junto con su extensión GeoBUGS para la estimación de modelos jerárquicos y espacio-temporales. Estas herramientas permiten combinar rigurosidad estadística con representación geográfica, facilitando la toma de decisiones basadas en evidencia territorial y son frecuentemente empleadas en el análisis espacial del crimen y en otros análisis referentes al espacio y diversas variables del entorno.

5. Estudios empíricos del crimen con estas técnicas de análisis espacial

El análisis espacial del crimen ha sido ampliamente utilizado en diversas regiones del mundo para comprender los factores que influyen en su distribución geográfica y temporal. A continuación, se presentan algunos ejemplos de estudios, donde se han empleado estos enfoques para analizar distintos tipos de delitos, en lugares como Nigeria, México, Indonesia, Brasil, Colombia y El Salvador.

Para la selección de los estudios empíricos incluidos en el artículo, se realizó una revisión sistemática de literatura académica y técnica en bases de datos reconocidas, considerando investigaciones publicadas entre 2010 y 2024 que aplicaran técnicas de análisis espacial y en algunos casos temporal al estudio de delitos, criminalidad y espacio geográfico. Se priorizaron estudios empíricos asociados a delitos como hurto, homicidios, con enfoque territorial y variables socioeconómicas relevantes, resultados clave, asegurando además una diversidad geográfica que permitiera representar distintos contextos regionales asociados a estudios espaciales de crimen y/o delitos en algunos países del mundo. Esta estrategia metodológica tuvo como propósito garantizar la representatividad y minimizar sesgos en la muestra analizada.

5.1. Análisis espacial del crimen en Nigeria

El estudio de Adeyemi *et al.* (2020) analiza la distribución espacial de delitos como robo a mano armada, hurto, violación y secuestro en Nigeria, utilizando datos oficiales de 2017. Mediante un enfoque bayesiano con simulaciones MCMC, los autores aplican modelos mixtos de Poisson y autorregresivos condicionales (CAR) para incorporar la correlación espacial entre estados y evitar sesgos propios de análisis convencionales. Se consideraron seis variables explicativas: tasa de desempleo, densidad poblacional, índice de educación, ingreso nacional bruto (GNI), porcentaje de población masculina y estructura policial. Además, se generaron mapas predictivos que permitieron identificar zonas críticas y orientar la planificación de seguridad (Adeyemi *et al.* 2020).

Los resultados evidencian patrones espaciales claros: el desempleo se asocia positivamente con la violación, el secuestro y el robo armado, y negativamente con el hurto. Asimismo, el GNI y el porcentaje de hombres están relacionados positivamente con todos los delitos analizados. La variación del crimen atribuida a efectos

espaciales fue del 27 % al 41 %, según el tipo de delito, lo que subraya la influencia territorial de los factores sociales. El estudio concluye que el crimen en Nigeria no es aleatorio, sino territorialmente estructurado y que los delitos siguen patrones espaciales influenciados por factores socioeconómicos y demográficos. La tasa de desempleo y la densidad poblacional juegan un papel clave en la incidencia del crimen, y la variación geográfica sugiere la necesidad de políticas de prevención del delito diferenciadas por región. Y recomienda fortalecer el uso de análisis espacial en la gestión de la seguridad pública (Adeyemi *et al.* 2020).

5.2. Análisis espacio-temporal de homicidios en México

El estudio de Trejo *et al.* (2024) analiza la distribución de homicidios en los 32 estados de México entre 2015 y 2022, incorporando variables socioeconómicas, poblacionales y climáticas. Se emplean modelos de regresión espacial y espacio-temporal, como GWR y GTWR, que demostraron un mejor ajuste en comparación con enfoques tradicionales (OLS, GLS y WLS), al capturar la variabilidad espacial y temporal del fenómeno. Las variables independientes incluyeron pobreza extrema, rezago educativo, inseguridad alimentaria, calidad de vivienda, temperatura y precipitación, usando datos del INEGI, CONEVAL, SEMARNAT y CONAGUA, junto a registros del Sistema Nacional de Seguridad Pública (Trejo *et al.* 2024).

Los resultados evidencian que los homicidios no siguen un patrón homogéneo, sino que responden a dinámicas espacio-temporales. La pobreza extrema, el rezago educativo y la inseguridad alimentaria se asociaron significativamente con el incremento de homicidios, especialmente en estados como Guanajuato, Estado de México y Veracruz. También se halló que las altas temperaturas y precipitaciones extremas contribuyen al aumento de homicidios, aunque con variaciones regionales y temporales. Por ejemplo, en los años 2017 y 2018 se identificaron picos de violencia coincidentes con crisis socioeconómicas y condiciones climáticas severas (Trejo *et al.* 2024).

El estudio concluye que los homicidios en México están fuertemente condicionados por factores territoriales y climáticos, y que modelos como GTWR son herramientas útiles para capturar esa complejidad. Se recomienda que las políticas públicas no sean homogéneas, sino adaptadas a la realidad espacio-temporal de cada región. Asimismo, se enfatiza que reducir las desigualdades sociales puede ser una estrategia clave para mitigar la violencia homicida en el país (Trejo *et al.* 2024).

5.3. Análisis espaciotemporal de los homicidios en El Salvador

El estudio de Carcach (2015) examina la distribución de los homicidios en los 262 municipios de El Salvador entre 2002 y 2013, empleando un modelo bayesiano espaciotemporal. Esta metodología permitió identificar clústeres persistentes de violencia, particularmente en la zona occidental del país, así como un proceso de expansión hacia el oriente. Además, se detectaron corredores de violencia conectados por rutas de homicidios recurrentes, asociados a la presencia

territorial de pandillas como la MS-13 y Barrio 18. El análisis demostró que los homicidios no se distribuyen aleatoriamente, sino que están estrechamente vinculados con factores estructurales del entorno geográfico y social.

Desde 2019, bajo la presidencia de Nayib Bukele, El Salvador ha experimentado un cambio drástico en sus políticas de seguridad. Con el lanzamiento del Plan Control Territorial y la posterior implementación del Régimen de Excepción en 2022, se reforzó el control estatal sobre zonas conflictivas, duplicando la presencia militar en tareas de seguridad ciudadana. Estas medidas derivaron en una notable disminución de los homicidios: de 6.656 casos en 2015 a 1.140 en 2021 (Plataforma por la Seguridad Ciudadana 2022). No obstante, organismos nacionales e internacionales han advertido sobre violaciones de derechos humanos, detenciones arbitrarias y debilidad de garantías procesales bajo este régimen.

A pesar de las críticas, el Informe Nacional Beijing +30 (Gobierno de El Salvador 2024) reconoce algunos avances institucionales en materia de seguridad, destacando el uso de tecnología para el monitoreo del crimen y la atención diferenciada a grupos vulnerables. En este contexto, los hallazgos del estudio de Carcach (2015) siguen siendo relevantes, al mostrar cómo los patrones de violencia requieren respuestas regionalizadas, más allá del enfoque exclusivamente represivo. La identificación de clústeres y corredores delictivos ofrece herramientas útiles para diseñar estrategias focalizadas que combinen prevención, intervención territorial y políticas de desarrollo.

5.4. Análisis espacial del crimen en la provincia de Riau, Indonesia

El estudio de Elzati *et al.* (2020), realizado en la provincia de Riau, Indonesia, analiza cómo factores socioeconómicos como el desempleo, la pobreza y la densidad poblacional influyen en la distribución espacial del crimen. Utilizando datos oficiales de 2018, aplicaron la técnica de GWR, comparándola con la OLS. Los resultados demostraron que la GWR ofrece un ajuste superior al capturar las variaciones locales en la relación entre las variables explicativas y la criminalidad, proporcionando una visión más detallada del fenómeno.

El análisis reveló que la criminalidad en Riau no es homogénea. La ciudad de Pekanbaru presentó las tasas más altas de crimen, asociadas a elevados niveles de desempleo, mientras que en la región de Kampar, la pobreza fue el factor más influyente. En otras áreas, la densidad poblacional no mostró una relación significativa con los niveles de criminalidad, lo que evidencia que los determinantes del delito varían según el contexto geográfico. Este hallazgo refuerza la necesidad de adoptar enfoques metodológicos que reconozcan la heterogeneidad espacial.

Como conclusión, el estudio destaca que las políticas públicas de seguridad deben ser territorialmente diferenciadas. Por ejemplo, en zonas urbanas como Pekanbaru se recomienda enfocarse en la reducción del desempleo, mientras que en áreas rurales como Kampar, las intervenciones deberían orientarse hacia la disminución de la pobreza. Además, se enfatiza la utilidad de técnicas como la GWR para diseñar

estrategias basadas en evidencia, adaptadas a las condiciones locales (Elzati *et al.* 2020).

5.5. Modelado espacial de homicidios en el estado de Pernambuco, Brasil

El estudio de Silva *et al.* (2020) analiza la distribución espacial de los homicidios en el estado de Pernambuco, Brasil, entre los años 2016 y 2019, con el objetivo de identificar patrones espaciales y determinar factores que expliquen su ocurrencia. Se aplicaron diversas técnicas de análisis espacial, incluyendo Índice de Moran Global y Local, Regresión de Mínimos Cuadrados Ordinarios y Regresión Geográficamente Ponderada, utilizando sistemas de información geográfica. Los hallazgos revelan una clara autocorrelación espacial en la distribución de homicidios, con concentraciones significativas en la Región Metropolitana de Recife y otras áreas urbanas (Silva *et al.* 2020).

El estudio empleó datos de homicidios registrados por la Secretaría de Defensa Social de Pernambuco (SDS-PE) entre 2016 y 2019, con información socioeconómica y demográfica obtenida del Instituto Brasileño de Geografía y Estadística (IBGE). Se aplicaron diversas metodologías estadísticas y geoespaciales para evaluar la relación entre la tasa de homicidios y factores como el Índice de Desarrollo Humano (IDH), el Índice de Gini, la proporción de población en pobreza y el grado de urbanización (Silva *et al.* 2020).

Para analizar la distribución espacial de los homicidios, se utilizó el Índice de Moran Global, el cual mostró un valor de $I = 0.49$, indicando una alta dependencia espacial de los homicidios en Pernambuco. También se aplicó el Índice de Moran Local, el cual identificó clústeres de alta incidencia (High-High, HH) en Recife, Zona da Mata y Agreste Pernambucano, y clústeres de baja incidencia (Low-Low, LL) en Sertão Pernambucano y Sertão de São Francisco (Silva *et al.* 2020). Además, se aplicó un modelo de Regresión de Mínimos Cuadrados Ordinarios para evaluar la relación entre los homicidios y las variables explicativas. Sin embargo, los residuos del modelo mostraron autocorrelación espacial significativa (I de Moran = 0.161, $p < 0.001$), lo que llevó a la implementación de un modelo más adecuado: la GWR (Silva *et al.* 2020).

El modelo GWR mostró una mejora significativa en la explicación de la variación de los homicidios en comparación con el modelo OLS. Mientras que OLS explicó el 44% de la varianza total ($R^2 = 0.44$), el GWR alcanzó un R^2 de 0.73, evidenciando un mejor ajuste al considerar la variabilidad espacial de los factores asociados a los homicidios en Pernambuco (Silva *et al.* 2020). Los hallazgos del modelo GWR indicaron que:

- El IDH tiene una relación negativa con la tasa de homicidios, lo que significa que municipios con mayores niveles de desarrollo humano tienden a registrar menos homicidios.
- El Índice de Gini y la proporción de población en pobreza tienen una relación positiva con la tasa de homicidios, confirmando que mayores niveles de desigualdad y pobreza están asociados con un aumento en los homicidios.
- El grado de urbanización también mostró una relación positiva con la criminalidad, sugiriendo que

las áreas más urbanizadas presentan una mayor incidencia de homicidios (Silva *et al.* 2020).

El estudio de Silva *et al.* (2020) evidenció que las tasas de homicidio más elevadas en el estado de Pernambuco, Brasil, se concentran en la Región Metropolitana de Recife, mientras que las zonas rurales, como el Sertão Pernambucano, presentan niveles significativamente más bajos. Esta distribución no aleatoria refleja patrones espaciales definidos, influenciados por factores como la urbanización acelerada y la desigualdad económica. En respuesta, los autores proponen políticas públicas diferenciadas por región, con especial atención en las áreas metropolitanas de alta incidencia, así como inversiones orientadas al desarrollo humano y a la reducción de la desigualdad. Asimismo, recomiendan el uso de técnicas como la GWR para optimizar la toma de decisiones en materia de seguridad y prevención del crimen.

5.6. Análisis espacial del hurto en Colombia en 2017

El estudio de López-Herrera *et al.* (2019) analiza la relación entre factores socioeconómicos y la incidencia de hurtos en 532 municipios de Colombia durante el año 2017, empleando RLM y GWR para capturar la variabilidad espacial del crimen. Se busca determinar cómo factores como el presupuesto per cápita, la tasa de matriculados en educación superior y la categoría del municipio explican la ocurrencia de hurtos en distintas regiones del país. Los resultados evidencian que estos factores explican el 69.5% de la variabilidad del hurto cuando se emplea RLM, y el 50.16% cuando se usa GWR, indicando que los efectos espaciales juegan un papel clave en la distribución del delito (López-Herrera *et al.* 2019).

El estudio empleó datos del Observatorio del Delito de la Policía Nacional de Colombia, así como información socioeconómica del Departamento Nacional de Planeación (DNP), el Ministerio de Educación Nacional y la Contaduría General de la Nación. Se compararon dos modelos: RLM, estimado globalmente, y GWR, que considera variaciones locales en los coeficientes. Ambos modelos fueron evaluados utilizando criterios estadísticos como el Coeficiente de Determinación Ajustado (R^2), el Criterio de Información de Akaike (AIC) y el Criterio Bayesiano (BIC) (López-Herrera *et al.* 2019).

Los resultados indican que el presupuesto *per cápita* tiene un impacto negativo en los hurtos, es decir, mayores inversiones públicas están asociadas con menores tasas de hurto. En contraste, la tasa de matriculados en educación superior por cada 1,000 habitantes muestra una relación positiva con el hurto, lo que podría indicar una mayor exposición al crimen en zonas con alta afluencia de estudiantes (López-Herrera *et al.* 2019). Los municipios con categoría especial y de primera categoría (mayor desarrollo económico y urbano) registraron tasas más altas de hurto, mientras que municipios de menor categoría mostraron tasas significativamente menores. Esto sugiere que los hurtos están más concentrados en ciudades con mayor actividad económica y movilidad de personas (López-Herrera *et al.* 2019).

En términos de ajuste del modelo, se encontró que el modelo de RLM global explica el 69.5% de la variabilidad del hurto, mientras que el modelo GWR explica el 50.16%, reflejando la importancia de la heterogeneidad espacial en la criminalidad. A pesar de que el GWR mejora la interpretación local del crimen, su menor capacidad explicativa se debe a la omisión de la variable categoría del municipio, que no se pudo incluir en este modelo debido a su naturaleza categórica (López-Herrera *et al.* 2019).

El estudio concluye que las tasas de hurto no son homogéneas en todo el país, sino que dependen de factores locales como la inversión pública y la movilidad de personas en cada municipio. Se destaca que el GWR es una herramienta útil para analizar la variabilidad espacial del crimen, permitiendo adaptar estrategias de seguridad a las necesidades de cada territorio (López-Herrera *et al.* 2019).

Desde una perspectiva de política pública, los autores recomiendan:

- Aumentar la inversión en seguridad y prevención del crimen en ciudades con alta incidencia de

hurtos, especialmente aquellas con mayor movilidad y densidad poblacional.

- Focalizar estrategias de seguridad en zonas con alta afluencia de estudiantes universitarios, dado que la relación positiva entre matriculados en educación superior y hurtos podría reflejar un mayor riesgo en estas áreas.
- Usar modelos geoespaciales avanzados como la GWR para mejorar la asignación de recursos de seguridad y prevención del crimen, permitiendo estrategias diferenciadas según las características de cada municipio (López-Herrera *et al.* 2019).

5.7. Síntesis comparativa de algunos estudios empíricos

A continuación, se presenta una tabla (Tabla 1) comparativa que sintetiza los principales elementos metodológicos, variables analizadas y hallazgos clave de los estudios empíricos revisados, con el fin de facilitar su contraste y destacar las tendencias comunes en la aplicación de técnicas espaciales al análisis del crimen.

Tabla 1: Resumen Comparativo de los estudios empíricos revisados

<i>País</i>	<i>Autores y Año</i>	<i>Tipo de delito</i>	<i>Tipo de análisis</i>	<i>Técnica / Método principal</i>	<i>Variables utilizadas</i>	<i>Resultados relevantes</i>	<i>Hallazgos clave</i>
Nigeria	Adeyemi <i>et al.</i> 2020	Robo hurto secuestro violación	Espacial	Modelo autorregresivo condicional (CAR)	Tasa de homicidios, pobreza, ingreso, desempleo, educación, densidad poblacional, infraestructura	Patrones espaciales significativos; dependencia espacial confirmada	Asociación positiva entre desempleo y crimen violento; mapas predictivos
México	Trejo <i>et al.</i> 2024	Homicidios	Espacio-temporal	GWR, GTWR, OLS	Homicidios, temperatura, precipitación, pobreza, población joven, urbanización.	GTWR mejoró ajuste sobre GWR y OLS; destaca rol de clima y pobreza	Zonas con altas temperaturas y pobreza concentran homicidios
El Salvador	Carcach 2015	Homicidios	Espacio-temporal	Modelo bayesiano espacio-temporal	Homicidios, edad, sexo, índice de desarrollo humano, migración, educación.	Modelo jerárquico capta variación espacial-temporal; destaca desigualdad	Efectos espacio-temporales con riesgo elevado persistente en zonas urbanas
Indonesia	Elzati <i>et al.</i> 2020	Delitos en general	Espacial	OLS, GWR	Crimen total, densidad poblacional, escolaridad, pobreza, cercanía a escuelas, mercados, cajeros.	Hotspots en zonas comerciales y transporte; Moran's I = 0.82	Correlación espacial en ciudades con pobreza y urbanización acelerada
Brasil	Silva <i>et al.</i> 2020	Homicidios	Espacial	OLS, LISA, GWR	Homicidios, IDH, Gini, pobreza, urbanización, Ingreso, desigualdad social, población urbana.	GWR mejora R ² de 0.44 (OLS) a 0.73; desigualdad y pobreza relevantes	Homicidios concentrados en áreas con desigualdad e ingreso bajo
Colombia	López-Herrera <i>et al.</i> 2019	Hurto	Espacial	OLS, GWR	Hurto a personas, nivel socioeconómico, equipamiento urbano, indicadores urbanos	GWR mejora ajuste espacial del hurto; zonas con mayor pobreza = más delitos	GWR revela variación espacial del hurto según condición urbana

Como puede observarse en la tabla comparativa (Tabla 1), los estudios revisados comparten un interés común por comprender los patrones espaciales y espaciotemporales del crimen, utilizando para ello metodologías cuantitativas avanzadas que permiten capturar la heterogeneidad territorial de los delitos. La aplicación de técnicas como GWR, GTWR, modelos bayesianos o análisis de autocorrelación espacial ha demostrado ser efectiva para identificar factores estructurales (como pobreza, desigualdad, desempleo y urbanización) que inciden de manera diferenciada según el contexto geográfico. Además, se evidencia que la elección metodológica varía según la disponibilidad de datos, el nivel de desagregación espacial y las capacidades técnicas de cada estudio, aunque se observa una tendencia clara hacia el uso de modelos multivariados localizados. Estos enfoques han permitido no solo mejorar el ajuste estadístico de los modelos, sino también generar información crítica para orientar estrategias de seguridad pública territorializadas. También se reafirma el valor del análisis espacial como herramienta clave para la formulación de políticas diferenciadas basadas en evidencia empírica y en el contexto analizado.

6. Conclusiones

El análisis realizado permite concluir que las técnicas espaciales como la GWR y la GTWR representan metodologías altamente eficaces para estudiar el comportamiento del crimen desde una perspectiva geográfica en distintos contextos geográficos y socioeconómicos. Estas herramientas han permitido identificar relaciones no uniformes entre el delito y factores como la pobreza, el desempleo, la desigualdad social, la densidad poblacional, el rezago educativo, el nivel de urbanización y las condiciones climáticas, variando su influencia según el contexto espacial y temporal de cada estudio.

Los estudios empíricos revisados en países como México, Brasil, Colombia, El Salvador, Indonesia y Nigeria demuestran que los delitos, particularmente homicidios y hurtos, no se distribuyen de manera aleatoria, sino que se concentran en corredores geográficos bien definidos, presentan patrones espaciales y mantienen clústeres persistentes en el tiempo. Se ha evidenciado que el desempleo tiene una incidencia mayor en contextos urbanos, mientras que la pobreza estructural es más significativa en zonas rurales. Asimismo, la desigualdad social y la urbanización acelerada en áreas metropolitanas actúan como factores amplificadores del crimen, generando entornos vulnerables para delitos como el robo, el hurto y el homicidio.

Los estudios muestran que factores estructurales como el ingreso per cápita, el acceso a servicios básicos, la segmentación territorial y la marginalidad inciden directamente en la concentración del crimen. En particular, se destaca que variables como la brecha educativa, la pobreza extrema y la inseguridad alimentaria se correlacionan positivamente con los homicidios, mientras que la inversión pública y el desarrollo humano suelen tener un efecto mitigador.

En términos de hallazgos particulares, se identificó que la precariedad económica y la falta de oportunidades están asociadas a un incremento en la actividad delictiva, mientras que el aumento en la asignación de fondos públicos para el desarrollo, como ocurre en algunas regiones colombianas, se vincula con una reducción de las tasas de hurto. Igualmente, algunos estudios señalan que la mayor afluencia de estudiantes en ciertas zonas urbanas puede incrementar la exposición al crimen, por lo que se requieren estrategias diferenciadas según el uso funcional del espacio. Por otro lado, condiciones climáticas extremas, como altas temperaturas y lluvias intensas, también han sido correlacionadas con aumentos en los delitos violentos, abriendo nuevas líneas para el análisis espaciotemporal de la criminalidad.

Por tanto, se recomienda que las políticas de prevención del delito incorporen análisis espaciales avanzados que consideren la heterogeneidad territorial y temporal de los factores asociados a la criminalidad. Las metodologías como la GWR y GTWR, combinadas con datos georreferenciados confiables, han permitido identificar patrones delictivos, establecer relaciones con factores estructurales, generar información valiosa y tener una base sólida para el diseño de estrategias de seguridad pública focalizadas y basadas en la evidencia, también para mejorar la asignación de recursos y apoyar decisiones informadas en planificación urbana y seguridad pública.

A pesar del creciente uso de técnicas de análisis espacial en el estudio del crimen, persisten vacíos significativos en la literatura. Uno de los principales desafíos identificados es la escasa disponibilidad de datos desagregados y georreferenciados, lo que limita la aplicación de modelos avanzados, particularmente en países Suramérica. Asimismo, se observa un sesgo geográfico en la concentración de estudios, predominando casos en contextos urbanos específicos, mientras que áreas rurales o intermedias permanecen poco exploradas. En cuanto a las técnicas empleadas, existe una tendencia a privilegiar modelos como GWR y GTWR, lo cual, si bien ha demostrado ser eficaz, podría restringir la exploración de otros enfoques estadísticos espacio-temporales igualmente relevantes, como los modelos bayesianos jerárquicos o las redes espaciales. Además, algunos estudios empíricos no explicitan con claridad sus criterios de selección de variables ni validan sus resultados mediante técnicas cruzadas o robustas, lo que plantea riesgos metodológicos. Estas limitaciones invitan a futuras investigaciones a diversificar tanto los enfoques como los contextos de análisis, fortalecer la transparencia metodológica y avanzar hacia una mayor integración entre técnicas espaciales cuantitativas y marcos teóricos críticos sobre el crimen.

Por otro lado, el análisis espacial se consolida como un enfoque clave para el estudio del crimen, proporcionando un marco técnico y conceptual para abordar fenómenos complejos desde una lógica territorial. A medida que las metodologías avanzan, se espera que su implementación en la investigación criminal siga contribuyendo al desarrollo de políticas más efectivas para la reducción de la delincuencia.

References

- ADEYEMI, R.A., MAYAKI, J., ZEWOIR, T.T., and RAMROOP, S., 2020. Demography and Crime: A Spatial analysis of geographical patterns and risk factors of Crimes in Nigeria. *Spatial Statistics*, **41**, 100485.
- BUIL-GIL, D., 2016. ¿Qué es la criminología?: Una aproximación a su ontología, función y desarrollo. *Derecho y cambio social*, **13**(44), 1.
- CARCACH, C., 2015. A spatio-temporal model of homicide in El Salvador. *Crime Science*, **4**(20), pp. 1–7.
- CHARLTON, M., FOTHERINGHAM, A.S., and BRUNSDON, C., 2007. Geographically weighted regression: Software for GWR. NCRM National Centre for Research Methods.
- CHEN, V.Y.J., YANG, T.C., and JIAN, H.L. 2022. Geographically Weighted Regression Modeling for Multiple Outcomes. *Annals of the American Association of Geographers*, **112**(5), pp. 1278–1295.
- CONGRESO DE COLOMBIA, 2000. Ley 599 de 2000 - Gestor Normativo - Función Pública. Available: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=6388> [8/15, 2012].
- ELZATI, R.W., ADNAN, A., YENDRA, R., and MUHAJIR, M.N., 2020. The Analysis Relationship of Poverty, Unemployment and Population with the Rates of Crime Using Geographically Weighted Regression (GWR) in Riau Province. *Applied Mathematical Sciences*, **14**(6), pp. 291-299.
- ESTELLER, G.M., 2014. Mapa del delito o geografía criminal. *Revista Skopein*, **2**, pp. 6–12.
- FOTHERINGHAM, A.S., BRUNSDON, C., and CHARLTON, M., 2002. Geographically weighted regression: The analysis of spatially varying relationships. Wiley.
- FOTHERINGHAM, A.S., CRESPO, R., and YAO, J., 2015. Geographical and temporal weighted regression (GTWR). *Geographical Analysis*, **47**(4), pp. 431-452.
- FRAILE, P., and BONASTRA, Q., 2011. Espacio, delincuencia y seguridad: hacia el diseño de un modelo de análisis territorial. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, **57**, pp. 123–146.
- GOBIERNO DE EL SALVADOR, 2024. Informe exhaustivo nacional Beijing +30: Trigésimo aniversario de la Declaración y Plataforma de Acción de Beijing. Ministerio de Relaciones Exteriores e ISDEMU.
- HERNANDO-SANZ, F., 2006. Eclecticismo y diversidad en la geografía del crimen y la delincuencia en el cambio de siglo. *Anales de Geografía*, **26**, pp. 9–30.
- HERNANDO, F., 2006. Geografía y violencia urbana. En A. Escobar Ohmstede (Ed.), *Tratado de Geografía Humana* (2ª ed., pp. 505–534). Anthropos – Universitat de Barcelona.
- HUANG, B., WU, B., and BARRY, M., 2010. Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house prices. *International journal of geographical information science*, **24**(3), pp. 383-401.
- LI, T., SHEN, H., YUAN, Q., and ZHANG, L., 2020. Geographically and temporally weighted neural networks for satellite-based mapping of ground-level PM2. 5. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **167**, pp.178-188.
- LÓPEZ-HERRERA, N.R., ACEROS-BUENO, M.A., and LUZARDO-BRICEÑO, M., 2019. Análisis de los hurtos en Colombia durante el año 2017 mediante los modelos de regresión lineal múltiple y la regresión ponderada geográficamente. *Revista Criminalidad*, **61**(3), pp. 141-163
- LU, B., CHARLTON, M., HARRIS, P., and FOTHERINGHAM, A.S., 2014. Geographically weighted regression with a non-Euclidean distance metric: a case study using hedonic house price data. *International Journal of Geographical Information Science*, **28**(4), pp. 660-681.
- MORILLAS-FERNÁNDEZ, D.L., 2010. Introducción a la Criminología. *Revista de Derecho*, **8**, pp. 29-60.
- PLATAFORMA POR LA SEGURIDAD CIUDADANA, 2022. Informe sobre seguridad ciudadana en El Salvador: Medición de indicadores 2021. San Salvador: Servicio Social Pasionista.
- RODRÍGUEZ-MANZANERA, L., 2003. Criminología (18ª ed.). México: Porrúa.
- SILVA, C., MELO, S., SANTOS, A., ALMEIDA-JUNIOR, P., SATO, S., SANTIAGO, K., and SÁ, L., 2020. Spatial Modeling for Homicide Rates Estimation in Pernambuco State-Brazil. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, **9**(12), 740.
- SORA-DÍAZ, J.S., and MOLINA-GÓMEZ, J.N., 2011. Análisis espacio-temporal de los determinantes del precio de la vivienda en la Localidad de Suba entre 2005 y 2011 mediante la regresión geográficamente ponderada. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- TREJO, K., CARRILLO-BRENES, F., VILCHES-BLÁZQUEZ, L.M., and SALAT, R., 2024. Examining Homicides, Victims, Socioeconomic Context, and Weather Conditions in Mexico Through Spatio-Temporal Dimensions. *Crime & Delinquency*, **1**(27).

VÁZQUEZ-GONZÁLEZ, C., and SOTO-URPINA, C., 2013. El análisis geográfico del delito y los mapas de la delincuencia. *Revista de Derecho Penal y Criminología*, 3.^a época, 9, 419–448. Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED).

APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA LIDAR A LA CARTOGRAFÍA Y MODELACIÓN DE LÍNEAS ELÉCTRICAS DE ALTA TENSIÓN

APPLICATION OF LIDAR TECHNOLOGY IN THE MAPPING AND MODELING OF HIGH-VOLTAGE POWER LINES

Mateo Pastrana^{a, b, *}, Nieves Quesada^b, Víctor Cicuéndez^b, Javier Coronel^a, Alfonso Gómez^{a, b}

^a Stereocarto S.L., Carretera de Canillas 134, 28043 Madrid, España. , mpastrana@stereocarto.com; , javiercoburneo@gmail.com; , agomez@stereocarto.com

^b Departamento de Ingeniería Agroforestal, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas, Universidad Politécnica de Madrid, Avda. Puerta de Hierro 2-4, 28040 Madrid, España. , mn.quesada@upm.es; , vm.cicuendez@upm.es

How to cite: M. Pastrana, N. Quesada, V. Cicuéndez, J. Coronel y A. Gómez. 2025. Aplicación de la tecnología LiDAR a la cartografía y modelación de líneas eléctricas de alta tensión. En libro de actas: *Quinto Congreso en Ingeniería Geomática*. Valencia, 2 – 3 de Julio de 2025. <http://dx.doi.org/10.4995/CIGeo2025.2025.19867>

Resumen:

Al mismo tiempo que aumenta el número de kilómetros de red eléctrica, la Estadística General de Incendios Forestales elaborada por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, recoge en su último informe, que las líneas eléctricas en España son causa cierta del 6.12% de los incendios forestales. Así mismo, las empresas eléctricas son, por legislación, responsables de mantener la infraestructura eléctrica en buenas condiciones ya que una gestión inadecuada, como la falta de poda de árboles y arbustos, puede aumentar el riesgo de que se produzcan incendios forestales debido a la interacción entre las líneas y la vegetación circundante. Las distancias de seguridad entre la vegetación y la línea eléctrica vienen establecidas por el Real Decreto 223/2008, de 15 de febrero, por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias ITC-LAT 01 a 09. En este contexto de incremento de la red eléctrica de alta tensión y la incidencia de ésta en el riesgo de ignición de un incendio forestal, se ha desarrollado este trabajo, cuyo objetivo principal es validar una solución integral para la inspección y modelación de líneas eléctricas de alta y media tensión con sensores aerotransportados y detectar puntos que incumplen las distancias de seguridad con la vegetación y otros elementos. La solución planteada es la captura de información mediante la combinación de diversos sensores transportados en helicóptero (cámara fotogramétrica RGB-IR, sensor LiDAR y sistemas de posicionamiento GPS y de orientación inercial) y la generación de productos de geoinformación como modelos digitales del terreno, modelos digitales de superficie y ortofotos digitales. Con esta técnica se pretende determinar si es posible obtener con exactitud el incremento de la flecha del cable y el desplazamiento lateral inducido y posición de cada catenaria en distintas condiciones ambientales: en condiciones normales de temperatura y viento en calma, en situación de máxima carga de la línea y en situación de viento extremo de 120 km/h, perpendicular a la línea y temperatura de 15° C. La metodología propuesta ha generado un modelo BIM del ecosistema de los corredores de líneas eléctricas para la supervisión automatizada de la vegetación y la identificación de su grado de interferencia con éstas. La recogida secuencial y repetitiva de la nube de puntos y su análisis comparativo permiten controlar automáticamente el crecimiento de la vegetación y cuantificar el volumen de vegetación que es necesario retirar, minimizando el coste en concepto de mantenimiento e indemnización por daños.

Palabras clave: LiDAR, Modelizado líneas alta tensión, Incendios forestales, BIM, Nube de puntos

Abstract:

At the same time that the number of kilometers of power lines increases, the General Statistics on Forest Fires, prepared by the Spanish Ministry for the Ecological Transition and the Demographic Challenge, states in its latest report that power lines are the confirmed cause of 6.12% of forest fires. In Spain, electricity companies are legally responsible for maintaining electrical infrastructure in good condition, since improper management, such as failing to prune trees and shrubs, can increase the risk of forest fires due to interaction between the lines and surrounding vegetation. The Royal Decree 223/2008 of February 15 establishes the safety distances between vegetation and power lines, which approves the regulations on technical conditions and safety guarantees in high-voltage power lines and their complementary technical instructions ITC-LAT 01 to 09. In this context—marked by the expansion of the high-voltage power grid and its impact on the risk of forest fire ignition—this study was developed with the main objective of validating an integrated solution for the inspection and modeling of high- and medium-voltage power lines using airborne sensors, and to detect points where safety distances from vegetation and other elements are not met. The proposed solution involves data

* Corresponding Author: Mateo Pastrana, mpastrana@stereocarto.com

capture using a combination of sensors mounted on a helicopter (RGB-IR photogrammetric camera, LiDAR sensor, GPS positioning system, and inertial orientation systems), along with the generation of geoinformation products such as digital terrain models, digital surface models, and digital orthophotos. This technique aims to assess the feasibility of accurately determining the increase in cable sag, the induced lateral displacement, and the position of each catenary under various environmental conditions. Three specific scenarios are considered: normal temperature and calm wind conditions; maximum line loading; and extreme wind conditions, with a wind speed of 120 km/h perpendicular to the line and an ambient temperature of 15 °C. The proposed methodology has produced a BIM model of the ecosystem surrounding power line corridors for the automated monitoring of vegetation and the identification of its degree of interference with the lines. The sequential and repetitive collection of point clouds and their comparative analysis allow for the automatic control of vegetation growth and the quantification of the vegetation volume that must be removed, minimizing maintenance costs and damage compensation.

Key words: LiDAR, Power lines Modelling, Forest fires, BIM, Point clouds

1. Introducción

Los incendios forestales constituyen una de las principales amenazas para los ecosistemas mediterráneos, provocando una degradación significativa del patrimonio natural, pérdidas económicas y, en ocasiones, afectación directa a la vida humana. En el caso de España, si bien la ocurrencia de incendios forestales es un fenómeno históricamente documentado, su impacto ha cobrado especial relevancia en los últimos años debido a una mayor visibilidad mediática, lo que ha favorecido una creciente sensibilización social. Según la Estadística General de Incendios Forestales elaborada por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, durante el periodo 2006–2015 se determinó el origen del 88 % de los siniestros, siendo el 53 % de origen intencionado y el 28 % resultado de negligencias o accidentes. En este último grupo se incluyen los incendios provocados por infraestructuras eléctricas, que representan un 6.12 % del total nacional (MITECO 2017).

Las líneas eléctricas son esenciales para el suministro energético y la integración de fuentes renovables, razón por la cual su expansión continúa a un ritmo del 2 % anual (REE 2025), incrementando así el riesgo de interferencia con la vegetación adyacente, especialmente en zonas de difícil acceso y elevado valor ecológico. La legislación vigente, concretamente el Real Decreto 223/2008, establece las distancias mínimas de seguridad entre los componentes lineales del sistema eléctrico y la vegetación circundante, las cuales varían en función de la tensión nominal de la línea: 2.0 metros para tensiones hasta 66 kV, 3.0 metros para tensiones superiores a 66 kV y hasta 220 kV, y 4.0 metros para tensiones superiores a 220 kV (RD 223/2008). Estas distancias deben mantenerse respecto a la posición más desfavorable del conductor, considerando máxima flecha y condiciones ambientales extremas.

En este contexto, la tecnología LiDAR (Light Detection and Ranging) se presenta como una herramienta particularmente eficaz para la inspección y modelización tridimensional del entorno eléctrico. Al permitir la generación de modelos digitales de elevada densidad y precisión, el LiDAR facilita la identificación de posibles invasiones vegetales que comprometan las condiciones de seguridad establecidas. Investigaciones previas han demostrado su utilidad en la reconstrucción automatizada de líneas eléctricas mediante métodos como el Piecewise Model Growing (PMG), con tasas de éxito superiores al 96 % y errores de localización inferiores a 5.2 cm, incluso en escenas con complejidad

estructural (Jwa and Sohn 2012). Del mismo modo, técnicas de clasificación de componentes eléctricos aplicadas a nubes de puntos han alcanzado precisiones del 99.58 % con errores medios de 0.19 m, distinguiendo con fiabilidad conductores, aisladores y tipos de torre (Ortega *et al.* 2019).

Junto a la inspección estructural, el control de la vegetación en corredores eléctricos ha sido abordado desde diversas aproximaciones. Qayyum *et al.* (2015) emplearon visión estéreo satelital para estimar altura y profundidad de vegetación, logrando un procesamiento más rápido y preciso que con algoritmos tradicionales. Por su parte, Takhirov and Israilov (2020) propusieron un sistema de monitorización repetitiva basado en nubes de puntos obtenidas con escáneres terrestres y aéreos, lo que permite seguir la evolución del crecimiento vegetal e identificar puntos críticos de interferencia. En línea con un enfoque predictivo, Mongus *et al.* (2021) aplicaron un modelo de fusión de datos (JDL/DFIG) con segmentación ecológica y regresión en conjunto, alcanzando una desviación estándar de 1 m en la simulación de crecimiento de árboles y un error de 0.37 m en la detección de vegetación invasiva.

Las condiciones meteorológicas extremas, particularmente el viento, también se han identificado como factores agravantes del riesgo de contacto entre vegetación y líneas eléctricas. En este sentido, Lee and Ham (2023) analizaron mediante datos LiDAR y modelado estructural la deflexión de árboles bajo diferentes velocidades de viento, observando que la probabilidad de ignición aumenta significativamente a partir de los 40.3 m/s, con especial sensibilidad al cociente entre la altura del árbol y el diámetro del tronco. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de considerar condiciones ambientales dinámicas en la evaluación del riesgo.

Por otra parte, la automatización de inspecciones mediante vehículos aéreos no tripulados (UAVs) equipados con sensores LiDAR ha demostrado ser una solución eficiente y rentable, permitiendo cubrir tramos de línea en apenas 10 minutos con intervención humana mínima (Guan *et al.* 2021). Esta tecnología se perfila como un componente clave para la modernización de la gestión de infraestructuras eléctricas en entornos forestales. La principal limitación de los UAVs en línea eléctrica se debe a la obligación de volar entre torres de amarre tramos completos de línea eléctrica debido a las condiciones ambientales y de carga eléctrica en el momento del vuelo.

En este trabajo se propone una metodología integral basada en sensores aerotransportados para la modelización tridimensional de catenarias en condiciones operativas reales. El objetivo es detectar, de forma precisa y automatizada, aquellos puntos donde se infringen las distancias de seguridad establecidas legalmente, considerando tanto el incremento de la flecha del cable bajo condiciones de máxima carga térmica como el desplazamiento lateral inducido por viento extremo (hasta 120 km/h a 15 °C). Esta solución busca optimizar las estrategias de inspección preventiva y minimizar el riesgo de ignición por contacto con vegetación en entornos de alta vulnerabilidad ambiental.

2. Materiales y Métodos

Este estudio se fundamenta en la modelización geométrica y evaluación de seguridad de líneas eléctricas aéreas de alta tensión a partir de datos LiDAR y fotogramétricos adquiridos mediante sensores aerotransportados, lo que permite la generación de un modelo BIM (Building Information Modeling) que integra la información geométrica y técnica de la infraestructura para su análisis y gestión eficiente. El área de trabajo abarca el trazado completo de la línea SIEPAC, una infraestructura regional de 1793 km que conecta los sistemas eléctricos de Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, Costa Rica y Panamá.

La adquisición de datos se llevó a cabo mediante una plataforma embarcada en helicóptero Bell 206, equipada con una cápsula Heli Utility POD que integraba un conjunto de sensores de alta resolución. El sistema comprendía un escáner LiDAR ALS60 (Leica Geosystems 2025), una cámara fotogramétrica RCD105 (Leica Geosystems 2025), sensores GNSS/INS, cámaras de vídeo digital y estaciones meteorológicas fijas situadas en puntos estratégicos en campo. Para garantizar una georreferenciación precisa, se desplegaron estaciones GNSS de referencia en tierra. Las operaciones de planificación del vuelo, calibración, captura y sincronización de los sensores fueron realizadas por la empresa Stereocarto S.L., siguiendo un diseño técnico específico para líneas de transmisión eléctrica. Las operaciones de planificación del vuelo, calibración, captura y sincronización de los sensores fueron realizadas por la empresa Stereocarto S.L., siguiendo un diseño técnico específico para líneas de transmisión eléctrica.

Las características principales de la campaña de vuelo se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1: Parametrización de los sensores usados en el estudio.

Parámetros	Valor	Unidades
Altura de vuelo sobre el terreno	350	m
GSD	30	cm
Recubrimiento longitudinal	60	%
FOV	45	°
Maximum scan rate	14.8	Hz
Maximum laser pulse rate	200000	Hz
Average point density	25	puntos/m ²

Una vez concluida la adquisición de datos, se procedió a la fase de tratamiento en gabinete. El procesamiento

inicial de los datos brutos LiDAR se realizó con Leica ALS Post Processor para decodificar y sincronizar la información capturada con el sistema GNSS/INS. Posteriormente, los datos fueron procesados y clasificados utilizando el software TerraScan (Terrasolid 2025), ejecutando filtros estadísticos y algoritmos basados en vecindario para eliminar ruido, normalizar alturas y asignar clases a los retornos según su morfología: suelo, vegetación (baja, media, alta), estructuras artificiales y conductores. En zonas con complejidad estructural se realizaron correcciones manuales supervisadas, validando la precisión geométrica con puntos de control conocidos.

A partir de la nube de puntos clasificada, se generaron productos derivados fundamentales para el análisis mediante TerraModeler y Global Mapper. El Modelo Digital del Terreno (MDT) se generó empleando una triangulación irregular (TIN) de los puntos clasificados como suelo, mientras que el Modelo Digital de Superficie (MDS) se construyó a partir de la envolvente superior de los puntos. La diferencia entre ambos permitió calcular modelos de altura normalizada. En paralelo, las imágenes adquiridas con la cámara RCD105 fueron orientadas y rectificadas mediante LPS (Leica Photogrammetry Suite), generando ortofotos georreferenciadas de alta resolución. Adicionalmente, se elaboraron perfiles longitudinales cada 10 metros, alineados con el eje del tendido eléctrico.

Una vez completado el modelo electromecánico, se procedió a la evaluación automática del cumplimiento normativo en materia de seguridad eléctrica. Usando las herramientas de análisis propias de PLS-CADD, se calcularon las distancias entre cada punto clasificado como vegetación y la posición más desfavorable del conductor. Este análisis se realizó teniendo en cuenta los umbrales legales de seguridad definidos por el Real Decreto 223/2008, que establece distancias mínimas de 2 m para tensiones hasta 66 kV, 3 m entre 66–220 kV y 4 m para líneas superiores a 220 kV. Todas las infracciones detectadas fueron cartografiadas y exportadas en formato vectorial, incluyendo metainformación sobre coordenadas, distancia residual y altura de la vegetación afectada, facilitando así la planificación de actuaciones correctivas y preventivas.

En resumen, la metodología desarrollada combina tecnologías de teledetección de alta precisión, procesamiento automatizado, modelización estructural y análisis normativo, permitiendo abordar de forma integral el problema de la interferencia de la vegetación con las líneas de transmisión en entornos complejos y de alto valor ambiental.

A continuación, se muestra el flujo de trabajo general (Fig. 1) para el estudio de la catenaria, esto es el modelado de la misma, los estudios mecánicos y la identificación de interferencias o violaciones de la distancia de seguridad entre la vegetación y las líneas eléctricas.

3. Resultados y discusión

La clasificación de datos LiDAR dio lugar a una nube de puntos en la que se puede identificar terreno, vegetación y construcciones (Fig. 2), permitiendo la generación de los modelos digitales del terreno (Fig. 3), y de los modelos digitales de superficie (Fig. 4), ambos con una

resolución de 0.25 m. El MDT es la representación de la superficie que resultaría de tener el terreno desnudo, libre de vegetación y construcciones, correspondiendo a lo que denominamos habitualmente suelo. El MDS corresponde a la representación de la superficie terrestre teniendo en cuenta los elementos existentes sobre la misma como son la vegetación, puentes, edificios, etc.

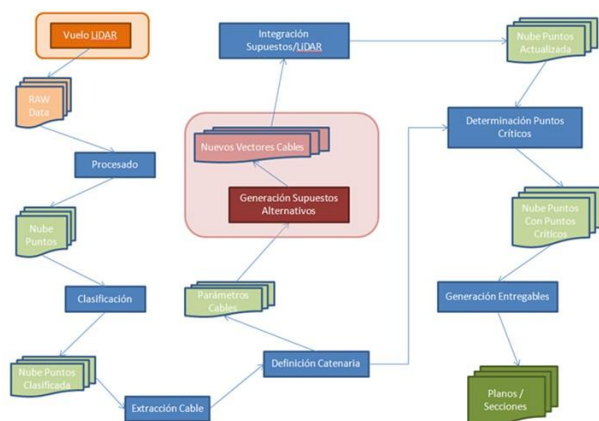


Figura 1: Flujo de trabajo general del estudio.

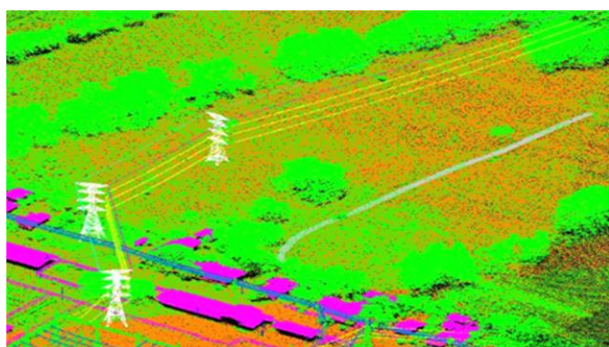


Figura 2: Nube de puntos LiDAR clasificada según el estándar ASPRS.

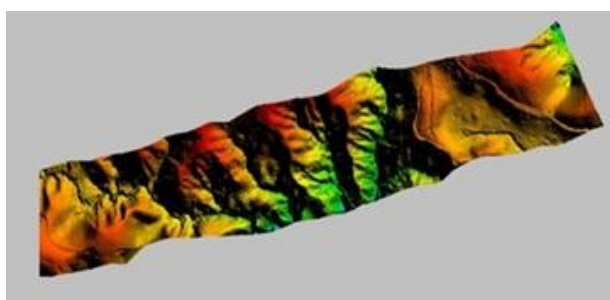


Figura 3: MDT representado por colores en función de la altura.

EL MDT junto con las fotografías aéreas y el proyecto de aerotriangulación permitió generar las ortoimágenes (Fig. 5) que son fotografías aéreas con el mismo valor cartográfico (precisión) que un plano sobre el cual se puede llevar a cabo mediciones de distancias, ángulos y superficies.

A partir de la identificación de los conductores, se ha obtenido su modelado en las mismas condiciones de vuelo y de los datos obtenidos de la clasificación LiDAR,

asignando además a cada uno de ellos, las condiciones climáticas que fueron recogidas en el momento de la detección de los mismos (temperatura, velocidad del viento y hora de realización de los vuelos) u otros adicionales (intensidad de corriente, dirección del viento, etc.) que estuvieran disponibles. El resultado es el modelo de la línea que está conformado por el terreno, las estructuras y todos los cables (Fig. 6).

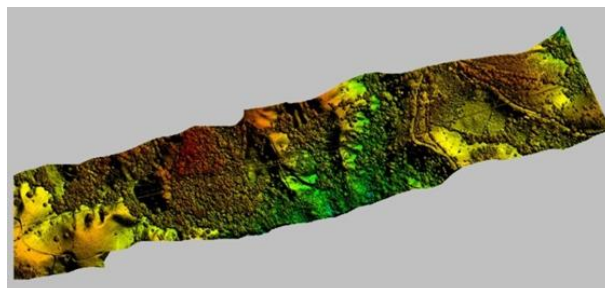


Figura 4: MDS representado por colores en función de la altura.



Figura 5: Ejemplo de ortoimagen de una torre de la línea de alta tensión.

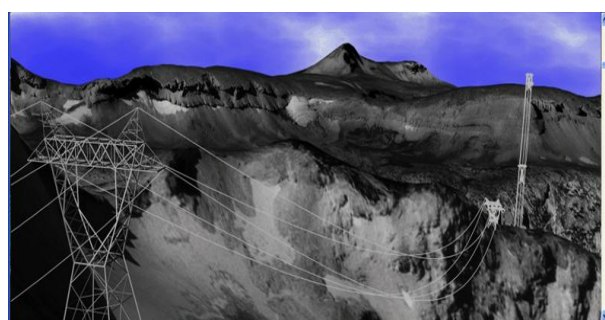


Figura 6: Ejemplo de modelización de la línea en PLS-CADD.

Considerando las distintas hipótesis climatológicas ("Weather cases") se realizaron los cálculos mecánicos de los vanos obteniendo como salida de cada cálculo de cambio de condiciones, tensiones, flechas, parámetros de catenarias, Esquema de Deslastre de Carga por Frecuencia (EDS), ángulos de desviaciones, etc. lo que permite simular el desplazamiento de los cables (Fig. 7).

El programa PLS-CADD automatiza la vectorización del cableado, así como el dibujo de los planos de planta y

perfil que son actualizados en tiempo real en cuanto se hacen los cambios en su diseño (Fig. 8). Con los datos LiDAR, la línea vectorizada, los parámetros climáticos y los cálculos mecánicos, se genera un modelo de la línea de transmisión, que puede ser combinado con distintos productos (ortofotografía, vídeo, etc.).

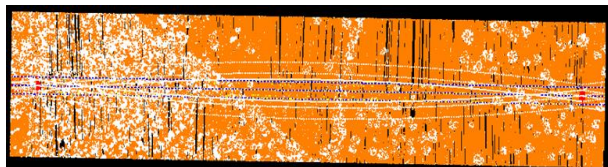


Figura 7: Ejemplo en planta de simulación del desplazamiento de los cables de torre a torre en función del weather case.

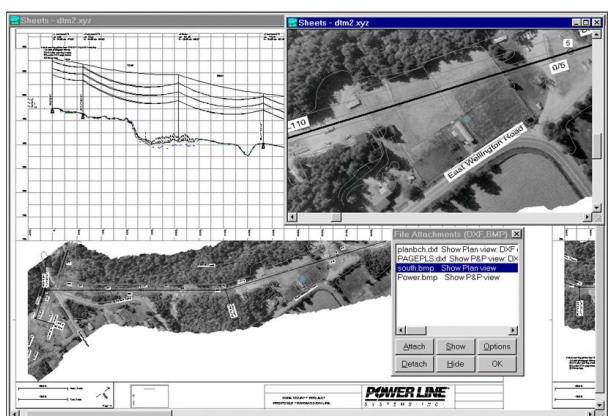


Figura 8: Ejemplo de diseños finales de Líneas de transmisión.

Una vez clasificados los puntos LiDAR y vectorizados cada uno de los conductores de las líneas eléctricas, se localizan puntos y áreas con distancias críticas (violaciones) en cada una de las hipótesis de viento y temperatura definidas anteriormente (Tabla 2). Los resultados se registran en forma de listado de puntos LiDAR clasificados como vegetación, edificaciones e infraestructuras que no cumplen con la distancia mínima establecida con el cableado de la línea.

Con la metodología descrita se ha generado un BIM del ecosistema de los corredores de líneas eléctricas para la supervisión automatizada de la vegetación y la identificación de su grado de interferencia con las líneas eléctricas. La implementación de este BIM permite habilitar un amplio espectro de aplicaciones orientadas a la gestión integral del activo. Entre sus principales utilidades se encuentra la elaboración de un inventario detallado de la red eléctrica y su entorno, lo que facilita

el conocimiento profundo de la infraestructura. Este modelo puede integrarse en un sistema de información geográfica (SIG), unificando criterios espaciales en un único sistema de referencia. Asimismo, posibilita el análisis del estado de la línea, incluyendo la evaluación de distancias críticas respecto a otros elementos como carreteras, edificaciones o vegetación, y proporciona soporte a las tareas de mantenimiento preventivo y correctivo. También permite planificar la sustitución de infraestructuras por causas de estabilidad del terreno o conflictos socioambientales, así como realizar estudios vinculados a derechos de vía, catastro y aspectos medioambientales. Desde el punto de vista de la ingeniería eléctrica, este recurso facilita tareas como la repotenciación de la línea, la instalación de un segundo circuito, el retensado de conductores y la integración con sistemas automáticos de gestión energética.

4. Conclusiones

La metodología desarrollada en este estudio pone de manifiesto el potencial del LiDAR como herramienta avanzada para la inspección y gestión de líneas eléctricas de alta tensión, superando significativamente las limitaciones de los métodos topográficos tradicionales. Frente a técnicas convencionales que requieren un acceso físico complejo, especialmente en entornos orográficos difíciles o de elevada fragilidad ambiental, el enfoque basado en sensores aerotransportados ofrece una alternativa más eficiente, precisa y segura.

La generación de nubes de puntos de alta densidad, en combinación con modelos digitales del terreno y de superficie, ha permitido reconstruir con gran detalle el entorno tridimensional de los corredores eléctricos. Esta capacidad ha sido clave para identificar con precisión geoespacial los puntos en los que se infringen las distancias mínimas de seguridad establecidas por el Real Decreto 223/2008, permitiendo planificar intervenciones con un enfoque proactivo y preventivo.

A diferencia de las metodologías topográficas clásicas, que requieren campañas de campo extensas, los datos LiDAR permiten un control secuencial y repetitivo del crecimiento de la vegetación, facilitando su monitorización automatizada en el tiempo. Esta ventaja no solo reduce los costes operativos y los tiempos de inspección, sino que también mejora la fiabilidad del análisis al incorporar información climática contextual y simular condiciones operativas reales mediante modelos electromecánicos de las catenarias.

Tabla 2: Ejemplo de puntos y áreas con distancias críticas.

Distancia apoyo (m)	Distancia cable (m)	Tipo	X (m)	Y (m)	Z (m)
22,3	0,12	Vegetación	334137,93	4216678,86	720,61
22,3	0,18	Vegetación	334137,98	4216678,85	720,66
22,3	0,22	Vegetación	334138,05	4216678,83	720,63
22,3	3,79	Construcción	334137,98	4216678,85	720,66
22,3	3,82	Construcción	334138,05	4216678,83	720,63
9,99	3,16	Vegetación	334169,98	4216834,57	692,72
9,99	3,21	Vegetación	334170,06	4216834,55	692,68

Asimismo, la integración de los productos derivados del LiDAR en entornos SIG y plataformas de modelización estructural como PLS-CADD permite desarrollar un modelo BIM del sistema eléctrico, habilitando su gestión integral. Este enfoque abre nuevas vías para la toma de decisiones basada en datos, la optimización del mantenimiento preventivo, la minimización del riesgo de ignición y la evaluación de soluciones estructurales alternativas.

En definitiva, el empleo de la tecnología LiDAR no solo constituye una mejora técnica en la modelización y

supervisión de líneas eléctricas, sino que representa un cambio de paradigma en la forma de abordar la gestión del riesgo asociado a la interacción entre infraestructuras energéticas y el medio natural.

Agradecimientos

Agradecemos a la empresa Stereocarto S.L. la cesión de los datos para la realización y el posterior modelado de las líneas eléctricas de alta tensión.

References

- GUAN, H., SUN, X., SU, Y., HU, T., WANG, H., WANG, H., PENG, C. and GUO, Q., 2021. UAV-lidar aids automatic intelligent powerline inspection. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **130**, 106987, ISSN 0142-0615. DOI: 10.1016/j.ijepes.2021.106987
- JWA, Y. and SOHN, G., 2012. A Piecewise Catenary Curve Model Growing for 3D Power Line Reconstruction. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **78**(12) pp. 1227-1240. DOI: 10.14358/PERS.78.11.1227
- LEE, S. and HAM, Y., 2023. Measuring the Distance between Trees and Power Lines under Wind Loads to Assess the Heightened Potential Risk of Wildfire. *Remote Sensing*, **15**(6), 1485. DOI: 10.3390/rs15061485
- Leica Geosystems, 2025. Leica Geosystems AG - Part of Hexagon. When it has to be right | Leica Geosystems. Available: <https://leica-geosystems.com/> [3/30, 2025].
- MITECO, 2017. Estadística General de Incendios Forestales, año 2015. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Available: https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/biodiversidad/temas/incendios-forestales/iiff_2015_def_tcm30-442974.pdf [3/30, 2025].
- MONGUS, D., BRUMEN, M., ŽLAUS, D., Kohek, Š., TOMAŽIČ, R., KERIN, U. and KOLMANIČ, S., 2021. A Complete Environmental Intelligence System for LiDAR-Based Vegetation Management in Power-Line Corridors. *Remote Sensing*, **13**(24), 5159. DOI: 10.3390/rs13245159
- ORTEGA, S., TRUJILLO, A., SANTANA, J.M., SUÁREZ, J.P. and SANTANA, J., 2019. Characterization and modeling of power line corridor elements from LiDAR point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **152**, pp. 24-33. ISSN 0924-2716. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.03.021
- QAYYUM, A., MALIK, A., SAAD, M., NAUFAL, M., IQBAL, M., ABDULLAH, M.F., ABDULLAH, T.A.R.B.T. and RAMLI, A., 2015. Power Lines Vegetation encroachment monitoring based on Satellite Stereo images using stereo matching. *2014 IEEE International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications, ICSIMA*. DOI: 10.1109/ICSIMA.2014.7047425
- RD 223/2008. BOE-A-2008-5269 Real Decreto 223/2008, de 15 de febrero, por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias ITC-LAT 01 a 09. Available: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2008-5269> [3/30, 2025].
- REE, 2025. Red Eléctrica de España. Informe anual completo | Red Eléctrica. Available: <https://www.ree.es/es/publicacion/informe-anual-completo> [3/30, 2025].
- TERRASOLID, 2025. TerraScan - Terrasolid Available: <https://terrasolid.com/products/terrascan/> [3/30, 2025].
- TAKHIROV, S. and ISRAILOV, M., 2020. Reduction of wildfire hazard by automated monitoring of vegetation interference with power lines: point cloud analysis combined with cable mechanics. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, **10**(1). DOI 10.1007/s13349-020-00426-z.

MAPPING OF HOTSPOTS CELLS AND BELTS BASED ON SPATIAL ANALYSIS OF MARITIME MIGRATION INCIDENT LOCATIONS

MAPEO DE CÉLULAS Y FRANJAS DE PUNTOS CRÍTICOS BASADO EN EL ANÁLISIS ESPACIAL DE LAS UBICACIONES DE INCIDENTES DE MIGRACIÓN MARÍTIMA

Donatien Agbissoh Otote*, Antonio Vázquez-Hoehne

Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía, ETSI Topografía, Geodesia y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, Campus Sur Avda. del Mediterráneo km 7,0, Calle Mercator 2, 28031 Madrid, Spain. , otote.agbissoh@alumnos.upm.es; , antonio.vazquez.hoehne@upm.es

How to cite: D.A. Otote, y A. Vázquez-Hoehne. 2025. Mapping of hotspots cells and belts based on spatial analysis of maritime migration incident locations. En libro de actas: *Quinto Congreso en Ingeniería Geomática*. Valencia, 2 – 3 de Julio de 2025. <http://dx.doi.org/10.4995/CIGeo2025.2025.19860>

Abstract:

The issue of maritime migration is a major challenge today. It poses a serious threat to lives, the political and economic situation in the Mediterranean Sea. This has led researchers to focus on finding practical solutions to improve decision-making and reduce the impact of these migration incidents. This work aims to examine the problem by using spatial analyses. These analyses will help identify the areas most affected by these incidents. By doing this, we can help those involved in maritime security, safety, and rescue operations use their resources and efforts more effectively to address these tragedies. To reach this goal, we have developed a thorough methodology with two main parts: "hotspot cell analysis" and "hotspot belt analysis". On the one hand, hotspot cell analysis uses grid cells to calculate key metrics. These include the survival margin index and the hotspot cell index. These metrics give important insights into the conditions in each cell, helping us understand risk and vulnerability better. On the other hand, hotspot belt analysis looks at broader areas called buffer belts or zones. It uses the same metrics, such as the survival margin index and the hotspot belt index, to identify trends and patterns across larger geographic regions. This approach provides an enriching view of the issues we face. Combining these analytical methods helps clarify the complexities of maritime migration incidents and supports informed decision-making and strategic action.

Key words: MMI, Spatial Analysis, Survival margin index, Hotspot cell index, Hotspot belt index

Resumen:

El problema de la migración marítima constituye un gran desafío hoy en día. Representa una seria amenaza para la situación política y económica del mar Mediterráneo. Esto ha llevado a los investigadores a centrarse en la búsqueda de soluciones prácticas para mejorar la toma de decisiones y reducir el impacto de estos incidentes migratorios. Este trabajo busca examinar el problema mediante análisis espaciales. Estos análisis ayudarán a identificar las zonas más afectadas por estos incidentes. De esta manera, podemos ayudar a quienes participan en las operaciones de seguridad marítima, protección y rescate a utilizar sus recursos y esfuerzos de forma más eficaz para abordar estas tragedias. Para lograr este objetivo, hemos desarrollado una metodología exhaustiva con dos partes principales: "análisis de celdas de puntos calientes" y "análisis de cinturones de puntos calientes". El análisis de celdas de puntos calientes utiliza celdas de cuadrícula para calcular métricas clave, como el índice de margen de supervivencia y el índice de celdas de puntos calientes. Estas métricas proporcionan información importante sobre las condiciones en cada celda, lo que nos ayuda a comprender mejor el riesgo y la vulnerabilidad. Por otro lado, el análisis de cinturones de puntos calientes examina áreas más amplias, denominadas cinturones o zonas de amortiguación. Utiliza las mismas métricas, como el índice de margen de supervivencia y el índice de zonas de riesgo, para identificar tendencias y patrones en regiones geográficas más amplias. Este enfoque proporciona una visión completa de los problemas con los que nos enfrentamos. La combinación de estos métodos analíticos ayuda a esclarecer las complejidades de los incidentes de migración marítima y facilita la toma de decisiones informada y la acción estratégica.

Palabras clave: MMI, Análisis espacial, Índice de margen de supervivencia, Índice de células de puntos calientes, Índice de cinturón de puntos calientes

* Corresponding Author: Donatien Agbissoh Otote, otote.agbissoh@alumnos.upm.es

1. Introduction

The maritime environment presents significant hazards to a range of vessels traversing the extensive Mediterranean Sea, especially those categorized as hazardous. Despite advancements in technology and the implementation of improved technical measures designed to enhance maritime navigational safety, there has been an alarming increase in maritime incidents, as documented by Carpenter (2016).

Since the early 21st century, the Mediterranean region has experienced numerous events predominantly identified as maritime migration incidents (MMIs), as emphasized by Lutterbeck (2021). Data from authoritative sources such as the International Organization for Migration (IOM) reveal that over ten thousand migratory incidents have been recorded within the Mediterranean Sea. These occurrences primarily take place within the initial kilometers off coastal areas, where intense hydro-atmospheric forces influence both vessel departure and arrival processes. Additionally, conditions on the high seas are exacerbated by prevailing wind and wave dynamics, thereby presenting substantial challenges to search and rescue operations.

The majority of these maritime incidents originate from unauthorized crossings of the Mediterranean by individuals from developing countries endeavoring to reach Europe. This critical issue has attracted considerable attention from media entities, geopolitical stakeholders, and academic researchers—particularly those specializing in geospatial analysis—who seek to comprehend and address the complexities inherent in this anthropogenic phenomenon.

The principal objective of this study is to present an advanced methodology based on spatial analysis intended to support maritime security and safety operations, maritime surveillance, and rescue missions, as delineated by Carneiro (2021). This tool aims to strengthen ongoing initiatives aimed at reducing the adverse outcomes of migration-related incidents, with a primary focus on safeguarding vulnerable lives in the Mediterranean region.

This paper proposes a spatial analysis framework that systematically identifies critical zones within the Mediterranean Sea, segmented into distinct cells and belts. The employed methodology utilizes a cognitive approach emphasizing point-in-time evaluations. Through this method, the study seeks to accurately identify areas requiring urgent attention and intervention, thereby contributing substantively to the improvement of maritime safety (Yang *et al.* 2013), security (Bueger 2015), and humanitarian efforts.

2. Study Area and Data

2.1. Study Area

The Mediterranean Sea, identified as a semi-enclosed intercontinental maritime basin, is predominantly bounded by the littorals of Southern Europe, North Africa, and the Middle East. This extensive marine domain extends from the Strait of Gibraltar in the west to the entrance of the Sea of Marmara (Dardanelles) in the east, incorporating the Suez Canal in its southeastern sector. Spanning an approximate length of 3,860

kilometers and encompassing nearly 2.5 million square kilometers, it represents the largest semi-enclosed sea globally. The critical juncture connecting it to the Atlantic Ocean via the Strait of Gibraltar is notably narrow, constricting to approximately 14.3 kilometers at its tightest segment.

Currently, the Mediterranean Sea constitutes the epicenter of a significant international crisis, namely, the Mediterranean migration crisis. This urgent phenomenon is characterized by a distressing succession of maritime migratory events resulting in numerous fatalities and disappearances. According to partial records compiled by the International Organization for Migration, approximately 2,000 such incidents have occurred within this maritime region between 2014 and 2024. The prevailing circumstances within this area highlight a multifaceted nexus involving geopolitical complexities, humanitarian imperatives, and persistent challenges confronting individuals endeavoring to seek refuge or improved prospects across these hazardous waters (Fig. 1).

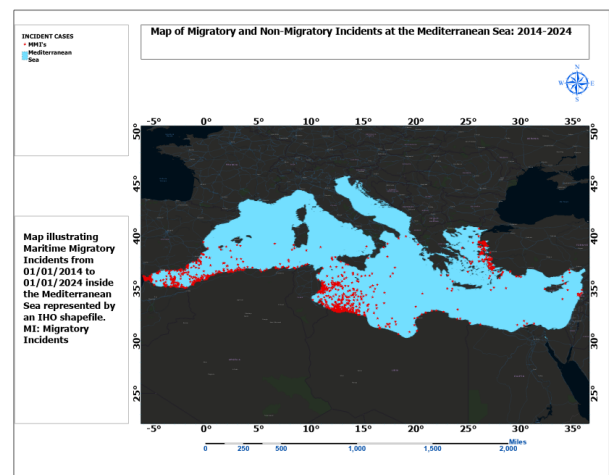


Figure 1: Study Area map.

2.2. Data

The dataset examined originates from the esteemed "Missing Migrants" platform maintained by the IOM and is systematically organized in a tabular format. It provides a detailed record of maritime migration incidents spanning a decade, specifically from January 2014 to January 2025. This significant dataset encompasses critical indicators such as the annual counts of fatalities, missing individuals, and survivors, each serving as vital metrics that elucidate the prevailing challenges associated with maritime migration. The analysis of these variables facilitates a comprehensive understanding of the spatial patterns underlying these incidents.

3. Method

The methodological framework is categorized into two distinct subsets: Hotspot Cell Analysis (Simon and Meyer 2010) and Hotspot Belt Analysis (Ji and Zhang 2023). Each subset is characterized by its unique structural approach; specifically, Hotspot Cell Analysis utilizes a mesh configuration, while Hot Spot Belt Analysis employs a belt-like structure.

This framework aims to extract and integrate crucial data within the analytical process, ultimately providing a comprehensive visualization of critical areas affected by maritime migration incidents. This visualization serves a vital purpose: to captivate the attention of stakeholders who are responsible for implementing decisions that can mitigate the adverse consequences associated with these incidents.

3.1. Hotspot Cells Analysis

The analysis of hotspot cells in this study aligns well with the margin survival index and frequency methods. The margin survival index is calculated by subtracting the death and missingness rates from the survival rate within uniformly sized cells derived from the Mediterranean Sea shapefile. Meanwhile, the frequency method uses the ratio of incidents to the total years of recorded incidence (N-1) within each cell. A positive margin survival rate indicates that death and missingness rates surpass the survival rate, while negative values suggest the opposite. Understanding this distinction is crucial for identifying hotspot and cold spot cells.

The implementation process for this method includes:

- Inputting the IMM data and defining the study area (Mediterranean Sea). In the execution of the hot spot cell analysis method, the initial phase requires the careful input of critical data necessary for the analytical process. This data comprises the MMI's shapefile alongside the shapefile representing the Mediterranean Sea area, as depicted in Figure 1.
- Tessellating the integrated study area and the MMI's data. The tessellation (Deger and Deger 2012) procedure entails the methodical division of the Area of Interest (AOI) into spatial pixels, commonly referred to as cells. This technique is particularly vital, as it addresses the complex intersections between the two input datasets, a concept that is further illustrated in Figures 2 and 3.

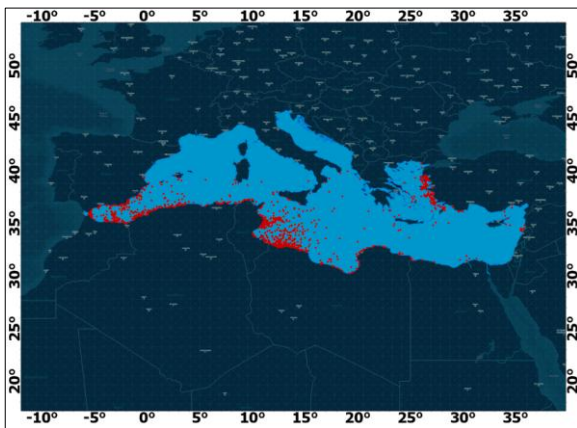


Figure 2: Visualization of Input data, MI's in red dots.

- Conducting a tabular calculation of survival margin rates (I_M). This step focuses on determining the key parameters needed for calculating the survival margin index, specifically the death and missing rate and the survival rate inside belts and cells (Table 1).

These are calculated using the following formulas:

- Death and Missing Rate (R_{dm}): This metric measures the proportion of individuals that either die or disappear from the population over the Total number of shipwrecked migrants.
- Survival Rate (R_s): This figure indicates the percentage of individuals who successfully survive during that period over the Total number of shipwrecked migrants.

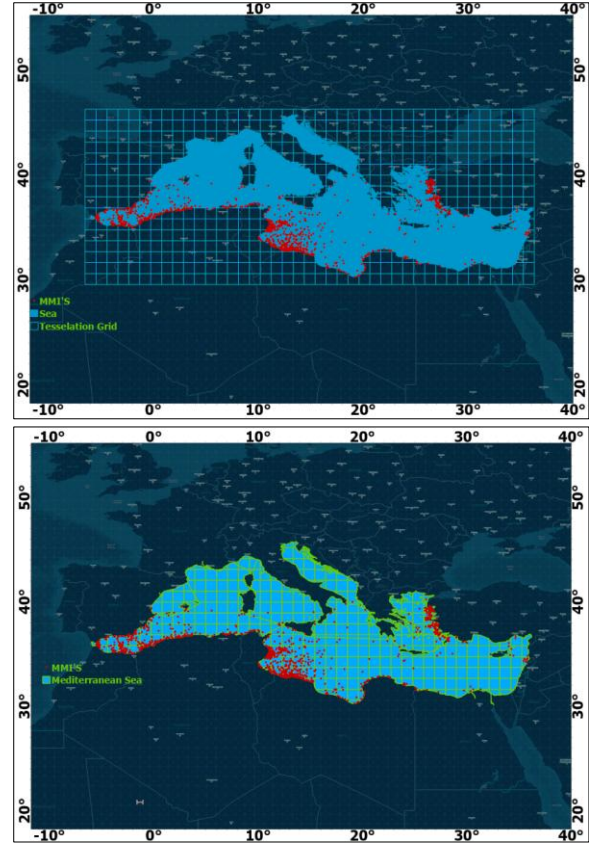


Figure 3: Visualization of the Tessellation process. MI's in red dots and AOI shapefiles in a blue polygon.

Key parameters for the survival margin Index include the death and missing rate and the survival rate, both derived from the given formulas (Eqs. 1, 2, and 3):

$$R_{dm} = \frac{\text{Dead \& Missing migrants count}}{\text{Total number of shipwrecked migrants}} \quad (1)$$

$$R_s = \frac{\text{Survivors count}}{\text{Total number of shipwrecked migrants}} \quad (2)$$

$$I_m = R_{dm} - R_s \quad (3)$$

- Conducting a tabular calculation of incident Frequency (F). Frequency serves as a critical metric that encapsulates the average annual incidents recorded within a particular cell. This metric is derived by calculating the ratio of (MMIS) within that cell to the total number of years (N-1) of statistical data available (Eq. 4).

$$F = \frac{\text{MMI Count in a cell}}{N-1} \quad (4)$$

- Hotspot cells index (I_{hc}). Hot spot cells are identified through a careful calculation of values that indicate higher death and missing rates (Table 2).

By analyzing these metrics, we can pinpoint areas needing further investigation or intervention, ensuring our findings are data-driven and relevant for decision-makers (Eq. 5).

$$I_{hc} = I_m \times F \quad (5)$$

- Visualization of survival margin rate, frequency and hotspot cells index. The survival margin rate is depicted using a two-colour gradient system as shown in Figure 4. The light-to-dark red gradient (0.02 to 1) highlights negative outcomes, where fatalities exceed survivors, while the blue gradient (-1 to -0.29) indicates better survival rates. The intermediate white area (0.28 to 0.01) represents uncertainty in survival outcomes.

In frequency visualizations, red values (5 to 8) reflect significant negative outcomes, while blue values (0 to 3) indicate survivors, with a neutral stance at value 4 in white. For hotspot visualizations, red values (-0.28 to 7) signify areas of concern, and blue values (-4.88 to -0.79) show higher survival rates, with uncertainty in the white area (-0.78 to 0.29).

These findings identify three risk corridors for clandestine immigration across the Mediterranean: the western Libyan corridor (Tripoli-Malta-Sicily), the Tabarca-La Galite-Sardinia corridor between Tunisia and Algeria, and the Strait of Gibraltar corridor between Morocco and Spain. These corridors highlight the dangers posed by hydro-atmospheric impacts.

3.2. Hotspot Belts Analysis

The methodology employed for conducting belt analysis mirrors that of hotspot grid analysis; however, it is essential to underscore a key distinction between the two approaches. Belt analysis incorporates equidistant buffer intervals, allowing for a more nuanced examination of spatial relationships, in contrast to hotspot analysis, which relies on uniformly sized cells.

- Inputting the IMM data and defining the study area (Mediterranean Sea).
- Belts generation. During the analysis phase, we employ the ArcGIS Pro Multibuffering tool to meticulously create internal buffers for the AOI, as delineated by the Mediterranean Sea shapefile. Our approach involves generating a series of ten concentric buffers, each diminishing in size by increments of 20 kilometers (Fig. 5). This process establishes a well-defined upper boundary at 0 kilometers and extends to a lower boundary beyond -200 kilometers, allowing for a comprehensive examination of spatial relationships within the AOI. The methodology utilized to tabulate hotspot cell values is fundamentally analogous to the procedures employed for analyzing hotspot cells, thereby ensuring both consistency and reliability throughout our analysis.
- Hotspot belts Index (I_{hb}). The methodology employed in tabulating hotspot cell values is fundamentally analogous to the established tabulation process utilized for hotspot cells (Table 3).

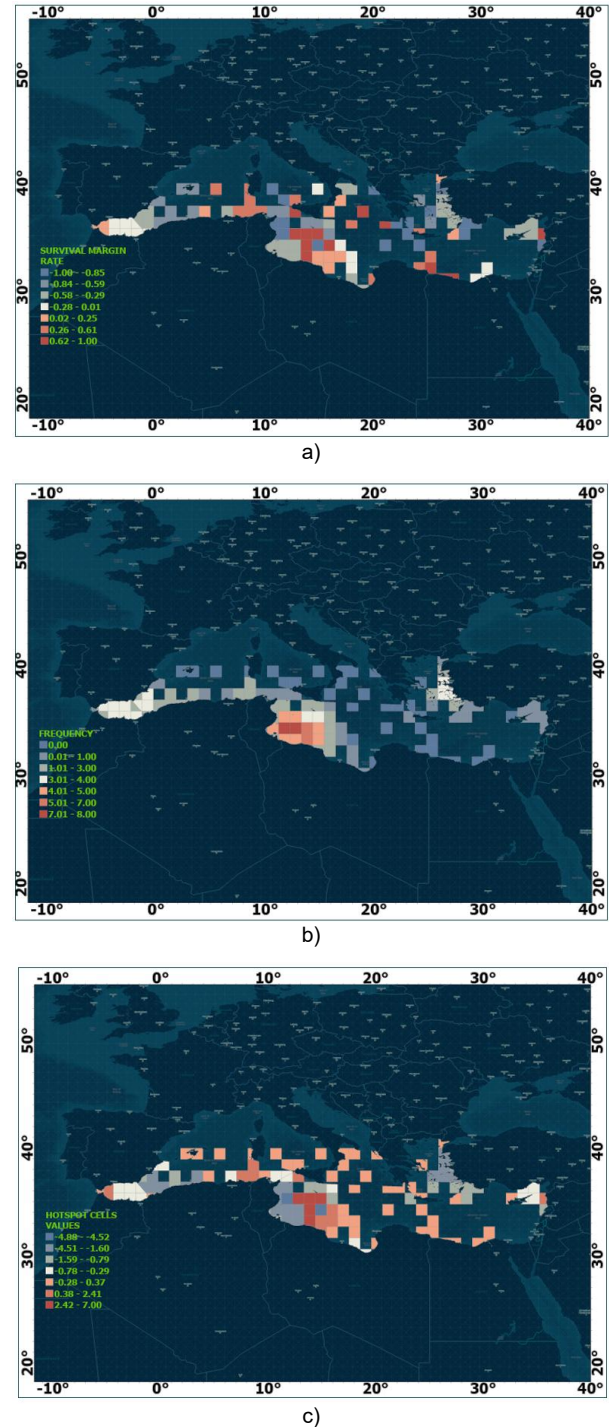


Figure 4: Visualization of: a) Survival margin rate; b) Frequency; c) Hotspot cells values.

- Visualization of survival margin rate, frequency and hotspot belts. When analyzing data sets like survival margin rates or frequency metrics, the visualization approach remains consistent, focusing on different values. The aim is to effectively visualize hot spot cells to identify significant areas for decision-making. Hotspot belts bands are shown using color gradients: positive values (B0, B2, B6, B7, B8) in red, and negative values (B1, B9) in cooler colors. Intermediate values (B3, B4, B5, B10) can be either positive or negative, reflecting non-extreme data (Fig. 6).

Table 1: Excerpt from the tables of death and missing rate, as well as the survival rate, and survival margin index inside cells.

Cells ID	Migrants Count	Number of Dead and Missing	Number of Survivors	(R_s)	(R_{dm})	(I_m)
1	14	8	6	0.43	0.58	0.14
2	51	23	28	0.5	0.45	-0.10
3	145	73	72	0.50	0.50	0.007
4	130	77	53	0.41	0.60	0.18
5	130	42	88	0.68	0.3	-0.3
6	130	42	88	0.68	0.32	-0.3
7	3	3	0	0	1	1
8	130	77	53	0.41	0.59	0.18
9	130	77	53	0.41	0.5	0.18
10	130	77	53	0.41	0.59	0.18

Table 2: Excerpt from the tables of Survival margin rate (I_m), Frequency, Hotspot cells values (I_{hc}).

Objectid	Total Number of Years	MMI Count/ Cell	(I_m)	F	(I_{hc})
1	10	20	0.14	2.0	0.286
2	10	42	-0.10	4.2	-0.40
3	10	4	0.00	0.4	0
4	10	20	0.20	2.0	0.37
5	10	50	-0.35	5.0	-1.77
6	10	53	-0.35	5.3	-1.77
7	10	60	1	6.1	6
8	10	50	0.18	5.0	0.92
9	10	29	0.18	2.9	0.55
10	10	13	0.18	1.0	0.18

Table 3: Excerpt from the tables of Survival margin rate (I_m), Frequency (F), Hotspot belts values (I_{hb}).

Belt ID	Incidents Count	Distance	Shipwrecked migrants	Dead and Missing count	Number of Survivors	R_{dm}	R_s	I_m	F	I_{hb}
1	8	[>200]	240	240	0	1.00	0.00	1.00	0.80	0.80
2	0	[180-200]	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	27	[160-180]	41	40	1	0.98	0.02	0.95	2.70	2.57
4	22	[140-160]	150	128	22	0.85	0.15	0.71	2.20	1.55
5	29	[120-140]	122	110	12	0.90	0.10	0.80	2.90	2.33
6	29	[100-120]	180	95	85	0.53	0.47	0.06	2.90	0.16
7	32	[80-100]	15	9	6	0.60	0.40	0.20	3.20	0.64
8	64	[60-80]	130	77	53	0.59	0.41	0.18	6.40	1.18
9	105	[40-60]	5	5	0	1.00	0.00	1.00	10.50	10.50
10	194	[20-40]	84	4	80	0.05	0.95	-0.90	19.40	-17.55
11	1189	[0-20]	20	12	8	0.60	0.40	0.20	118.90	23.78

4. Discussion

The ongoing maritime migration crisis in the Mediterranean highlights the urgent need for contributions to address irregular migration. This manuscript presents a spatial analysis methodology aimed at understanding maritime migration dynamics and improving response strategies. It focuses on two types of analyses: hotspot grids and hotspot belts, using key parameters such as annual incident counts, shipwrecks, casualties, and survivors. By examining

these factors, we can identify the most dangerous areas where lives are lost, or individuals go missing.

This information is paramount for surveillance agencies, rescue teams, and decision-makers involved in maritime safety and security, as it serves to prevent future catastrophes. The hotspot grid analysis identified 158 cells, representing approximately 35.5% of the total, classified as hotspots (marked in red) with values ranging from 0 to 7, indicating a high frequency of significant maritime migration incidents. In contrast, 214

cells, or 48.10% of the total, are categorized as cold spots (marked in blue) with values between -4.52 and -0.79, indicating lower intensity of maritime migration incidents in these areas. An intermediate category consists of 73 cells (16.4%) with values between -0.79 and 0.28, reflecting a reduced frequency of incidents and less critical conditions, represented in white.

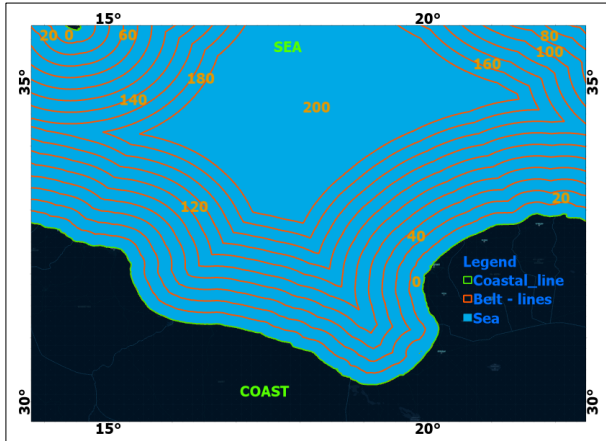
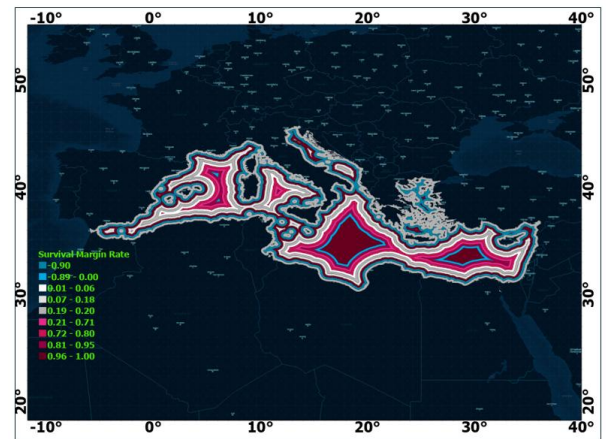


Figure 5: Visualization of belts with a 20 km Interval.

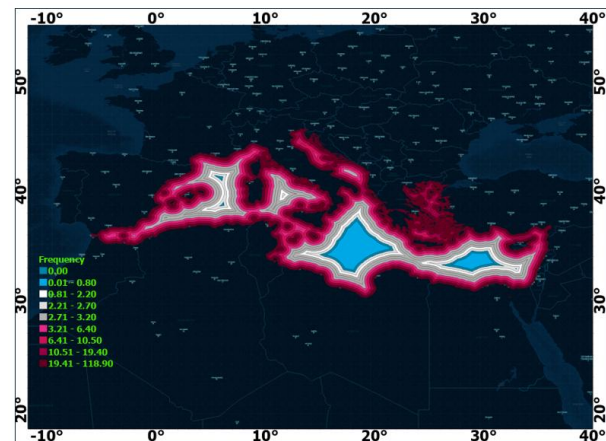
In the hotspot belt analysis, the red gradient bands (B1, B3, B7, B8, B9) denote regions with a high incidence of severe maritime migration incidents, while the blue gradient bands (B2, B10) signify cold spot belts with fewer incidents. The gray gradient areas (B4, B5, B6, B11) reflect moderate conditions characterized by a lower occurrence of severe incidents. Ultimately, survival rates align with frequency rankings across the three identified corridors: the Moroccan-Andalusian corridor, the Algerian Tunisian corridor to Sardinia, and the Libyan corridor to Malta and Sicily. In all three corridors, both survival rates and incident frequencies are notably high, suggesting that the most dangerous routes are also the most traversed.

This analysis presents two hypotheses about tragic zones in maritime contexts. The first is the coastal tragic zone, where fragile vessels face initial challenges from adverse sea conditions and increasing wave heights as they approach land, correlating more with incident frequency than survival rates. The second hypothesis focuses on the high seas, where strong winds and waves complicate rescues, relating more to the severity of shipwrecks than their occurrence. This framework enhances our understanding of maritime migration incidents and is essential for guiding interventions to prevent future tragedies, helping stakeholders in maritime safety and security collaborate effectively.

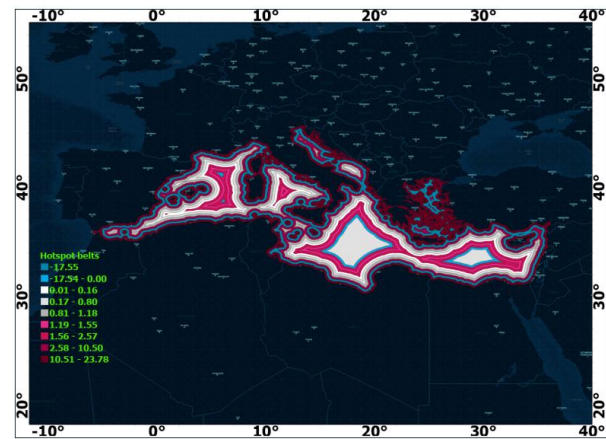
Despite the evident advantages afforded by these analyses, a persistent and critical challenge endures: the problem of data insufficiency. This issue predominantly arises from the inability to acquire information in real time, thereby constituting a substantial impediment to conducting comprehensive analyses. The ambiguous nature of this limitation constrains the validity of our findings and obstructs effective decision-making processes. Addressing this challenge is imperative for augmenting the reliability and applicability of analytical results, thereby highlighting the necessity for enhanced data acquisition methodologies.



a)



b)



c)

Figure 6: Visualization of: a) Survival margin rate; b) Frequency; c) Hotspot belts values.

5. Conclusion

Utilizing two distinct spatial analytical methodologies—namely, hotspot grid analysis and hotspot belt analysis—this study demonstrates that all identified regions are susceptible to maritime migration incidents. Nevertheless, the intensity of these incidents exhibits considerable variation across different locales. A straightforward color-coded scale is employed to delineate areas warranting more immediate intervention.

The principal objective of this research is to elucidate the spatial dimensions of the migration crisis in the Mediterranean Sea. In doing so, it furnishes enhanced tools and methodological approaches aimed at addressing the severe consequences of these maritime events, particularly with respect to mortality rates and incidences of disappearance.

The investigative techniques applied herein facilitate the identification of specific high-risk zones where prioritization for interception and rescue operations targeting vulnerable individuals aboard precarious vessels is imperative. Concentrating efforts on these

zones is critical to mitigating the tragic loss of life and reducing the number of missing persons at sea.

The findings derived from this inquiry not only advance comprehension of the spatial dynamics underpinning the crisis but also emphasize the exigent need for informed and strategic responses.

In conclusion, this framework not only systematizes analytical approaches but also accentuates the significance of employing visual data representations to effectively confront unresolved challenges inherent in maritime migration.

References

- BUEGER, C., 2015. What is maritime security? *Elsevier, Marine Policy*, **53**, pp. 159-164. DOI: 10.1016/j.marpol.2014.12.005
- CARNEIRO, J.P., 2021. Maritime Search and Rescue. *Taylor & Francis Online, IETE Technical Review*, **36**, pp. 111–114. DOI: 10.1080/02564602.1988.11438248
- CARPENTER, A., 2016. European Maritime Safety Agency Activities in the Mediterranean Sea. In: Carpenter, A., Kostianoy, A. (eds) *Oil Pollution in the Mediterranean Sea: Part I. The Handbook of Environmental Chemistry*, **83**. Springer, Cham. DOI: 10.1007/698_2016_18
- DEGER, K.O., and DEGER, A.H., 2012. An Application of Mathematical Tessellation Method in Interior Designing. *Elsevier, Procedia - Social and Behavioral Sciences*, **51**, pp. 249-256. DOI: 10.1016/j.sbspro.2012.08.154
- JI, Y., and ZHANG, L., 2023. Comparative analysis of spatial–temporal differences in sustainable development between the Yangtze River Economic Belt and the Yellow River Economic Belt. *Springer Nature Link, Environment, Development and Sustainability*, **25**, pp. 979–994. DOI: 10.1007/s10668-021-02087-4
- LUTTERBECK, D., 2021. Blue vs Green: The Challenges of Maritime Migration Controls. *Taylor & Francis Online, Journal of Borderlands Studies*, **36**, pp. 727-743. DOI: 10.1080/08865655.2019.1652672
- SIMON, M., and MEYER, E.L., 2010. Detection and analysis of hot-spot formation in solar cells. *Elsevier, Solar Energy Materials and Solar Cells*, **94**, pp. 106-113. DOI: 10.1016/j.solmat.2009.09.016
- YANG, Z.L., WANG, J., and LI, K.X., 2013. Maritime safety analysis in retrospect. *Taylor & Francis Online, Maritime Policy & Management*, **40**(3), pp. 261–277. DOI: 10.1080/03088839.2013.782952

ESTUDIO ESPACIO-TEMPORAL DE LOS NIVELES DE EUTROFIZACIÓN EN EL EMBALSE POZA HONDA – ECUADOR MEDIANTE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN

SPATIO-TEMPORAL STUDY OF EUTROPHICATION LEVELS IN THE POZA HONDA RESERVOIR - ECUADOR USING REMOTE SENSING TECHNIQUES

Joyce Solórzano^{a,*}, Johanna Ayala-Izurieta^b, Lissette Sánchez-Pérez^a, Jesús Delegido^a

^a Image Processing Laboratory (IPL), Universitat de València, Paterna, 46980 Valencia, España. , joysomo@alumni.uv.es; , ligsawan@alumni.uv.es; , jesus.delegido@uv.es

^b Facultad de Ciencias, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Universidad de Riobamba, Riobamba, 060106 Chimborazo, Ecuador. , joeai@alumni.uv.es

How to cite: J. Solórzano, J. Ayala-Izurieta, L. Sánchez-Pérez y J. Delegido. 2025. Estudio espacio-temporal de los niveles de eutrofización en el embalse Poza Honda – Ecuador mediante técnicas de teledetección. En libro de actas: *Quinto Congreso en Ingeniería Geomática*. Valencia, 2 – 3 de Julio de 2025. <http://dx.doi.org/10.4995/CIGeo2025.2025.19861>

Resumen:

Los embalses localizados en regiones de clima tropical, como en la provincia de Manabí, en Ecuador, suelen enfrentar problemas de eutrofización. El embalse Poza Honda, una fuente esencial de agua para consumo humano y actividades de riego, ha estado sometido a una creciente presión en los últimos años, lo que ha afectado negativamente a su calidad. Este trabajo tuvo como propósito principal el estudio de manera espaciotemporal de los niveles de eutrofización en el embalse Poza Honda, empleando técnicas de teledetección, y analizando parámetros como clorofila-a (Chl-a), sólidos suspendidos totales (SST), y también la transparencia con Disco Secchi (DS). Para ello, se han usado imágenes del satélite europeo Sentinel-2 que han sido procesadas con el software libre SNAP (Sentinel Application Platform), que permite generar productos automáticos de calidad de aguas derivados de las tres versiones de Case 2 Regional CoastColour (C2RCC). Tras comparar los resultados con datos *in situ*, se identificó que la corrección atmosférica más adecuada fue la versión C2X. Asimismo, la distribución espacial de los parámetros permitió observar que existe mayor concentración de Chl-a, SST, y menor transparencia en la parte media y margen oriental del embalse. El análisis espaciotemporal permitió observar máximos de Chl-a de 38,63 mg/m³ en el año 2019, SST de 25 g/m³ en el 2020, y mínima profundidad con disco Secchi (DS) de 0,41 m en el mismo año. En contraste, los valores más bajos de Chl-a y SST se dieron en 2022, con valores 0,30 mg/m³ para Chl-a y 0,003 g/m³ para SST, alcanzando el máximo de DS con 13 m. Así también, en el 2016, 2017, 2019, 2020 y 2021, se observó que el estado trófico del embalse se encontraba como hipertrófico y eutrófico. No obstante, para el 2022 y 2023 presentaba estados mesotrófico y oligotrófico. Sentinel-2, es una herramienta eficaz para el monitoreo de la calidad en cuerpos de agua, y sus productos automáticos de calidad de aguas permiten optimizar recursos y contribuir a la mejora de regiones que presentan desafíos ambientales.

Palabras clave: Clorofila-a, Sólidos en suspensión, Disco de Secchi, C2RCC, Sentinel-2

Abstract:

Reservoirs located in tropical climate regions, such as in the province of Manabí in Ecuador, often face eutrophication problems. The Poza Honda reservoir, an essential source of water for human consumption and irrigation activities, has been under increasing pressure in recent years, which has negatively affected its quality. The main purpose of this work was the spatio-temporal study of eutrophication levels in the Poza Honda reservoir, using remote sensing techniques, and analysing parameters such as chlorophyll-a (Chl-a), total suspended solids (TSS), and also transparency with Secchi Disk (DS). For this purpose, images from the European Sentinel-2 satellite were used and processed with the free software SNAP (Sentinel Application Platform), which allows the generation of automatic water quality products derived from the three versions of Case 2 Regional CoastColour (C2RCC). After comparing the results with *in situ* data, it was identified that the most suitable atmospheric correction was the C2X version. Also, the spatial distribution of the parameters showed that there is a higher concentration of Chl-a, TSS, and lower transparency in the middle and eastern margin of the reservoir. The spatio-temporal analysis showed maximum Chl-a of 38.63 mg/m³ in 2019, TSS of 25 g/m³ in 2020, and minimum Secchi disk depth (SD) of 0.41 m in the same year. In contrast, the lowest Chl-a and TSS values occurred in 2022, with values of 0.30 mg/m³ for Chl-a and 0.003 g/m³ for TSS, reaching the maximum DS of 13 m. Also, in 2016, 2017, 2019, 2020, and 2021, the trophic status of the reservoir was observed to be hypertrophic and eutrophic. However, by 2022 and 2023, it presented mesotrophic and oligotrophic states. Sentinel-2 is an effective tool for

* Corresponding Author: Joyce Solórzano, joysomo@alumni.uv.es

monitoring water quality in water bodies, and its automatic water quality products allow optimising resources and contribute to improving regions with environmental challenges

Key words: Chlorophyll-a, Suspended solids, Secchi disk, C2RCC, Sentinel-2

1. Introducción

En Ecuador, las cuestiones de calidad del agua, ecosistemas acuáticos y servicios ecosistémicos reciben una atención limitada. Los procedimientos de muestreo estandarizados y los programas de monitoreo ambiental no se encuentran disponibles para evaluar la calidad del agua. Esto da como resultado una disponibilidad limitada de información sobre el estado físico, químico y ecológico de los ríos y embalses ecuatorianos (Nolivos *et al.* 2015).

De acuerdo con Bernal *et al.* (2023), los embalses situados en climas tropicales como en la provincia de Manabí tienen problemas de eutrofización. Esto se debe a una sobrecarga continua de nutrientes que aceleran estos procesos, apareciendo la proliferación de fitoplancton. Poza Honda es uno de los embalses más importantes para el trasvase de agua entre cuencas, vital para consumo humano y riego. No obstante, durante los últimos años, se ha ejercido una gran presión sobre los ecosistemas naturales en la cuenca del río Portoviejo, debido a actividades antropogénicas que incluyen al uso intensivo de la tierra, y el aumento de la ganadería.

La teledetección puede ser una técnica valiosa para analizar diferentes parámetros necesarios para conocer la calidad de agua. Este es el caso de la clorofila-a (Chl-a) que es un pigmento de color verde del fitoplancton donde reside principalmente el proceso de fotosíntesis, y es considerada una de las principales variables para conocer la eutrofización de cuerpos de agua (García-Nieto *et al.* 2024). Así también, los sólidos suspendidos totales (SST) que son el total de materia en suspensión en una muestra de agua por unidad de volumen, e incluye partículas muertas, inertes o degradadas. Finalmente, la transparencia, que hace referencia a la claridad del agua, es decir, cuánta luz puede pasar a través de ella, y que es el resultado de la presencia de todos los elementos ópticamente activos que pueden hallarse en el agua (Anurogo *et al.* 2023). Dichos parámetros pueden ser obtenidos de los productos automáticos derivados de algunas imágenes satelitales, permitiendo conocer su distribución espacial y temporal y con esto la posibilidad de detectar posibles fuentes de contaminación en las masas de agua.

Por todo ello, el objetivo principal de este trabajo fue estudiar de forma espacio-temporal los niveles de eutrofización en el embalse Poza Honda – Ecuador mediante técnicas de teledetección. Los resultados del presente estudio pueden ser utilizados en la gestión de los cuerpos de agua, estableciendo prioridades para la conservación de esta y otras cuencas fluviales similares, donde los recursos hídricos sufren múltiples amenazas.

2. Materiales y Métodos

2.1. Área de estudio

La represa de Poza Honda, se encuentra en la región Costa del Ecuador, ubicada a 360 km de Quito, la capital del país, específicamente en el centro oriente de la provincia de Manabí, en el cantón Santa Ana (Fig. 1).

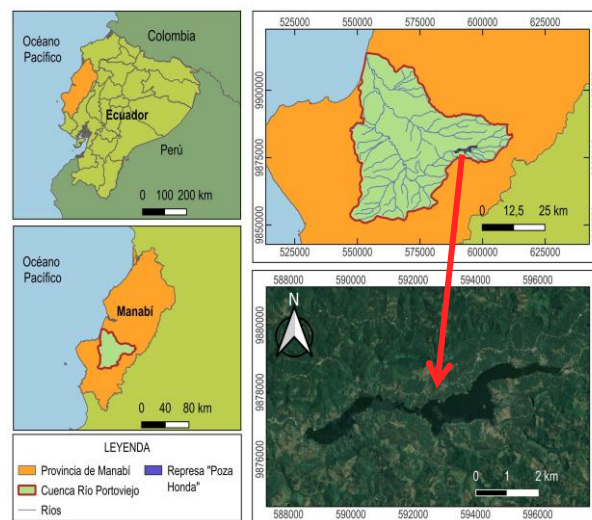


Figura 1: Ubicación de la represa Poza Honda en la cuenca del Río Portoviejo.

Esta represa comenzó a operar en el año 1971 y pertenece a la cuenca hidrográfica del Río Portoviejo. Está diseñada para almacenar 89 millones de m³ de agua, y posee una longitud de 12 km y una profundidad de 38,3 m (Coral 2021).

La zona está dominada por el clima tropical seco (Ramos *et al.* 2021). La media anual de la temperatura es de 26 °C. Presenta dos épocas, la época lluviosa (diciembre - mayo) y la época seca (junio - noviembre) (Barreto *et al.* 2018).

Gran parte de los habitantes de la zona se dedican a la ganadería y a la agricultura. De acuerdo a Coral (2021), un 50% de los habitantes se dedican a esta última, donde los productos cultivados generalmente son el café, maíz, cacao y arroz, entre otros.

2.2. Metodología

El presente estudio utilizó imágenes satelitales Sentinel-2 (S2), las cuales se descargaron de manera gratuita en la página web del proyecto Copernicus (Copernicus 2024). Sentinel-2 es una constelación de tres satélites con una anchura de franja de 290 km y transporta un sensor multispectral de 12 bits que cubre 13 bandas de longitud de onda diferentes en el visible e infrarrojo cercano (VINIR) y en el infrarrojo de onda corta (SWIR), compuestas por cuatro bandas a 10 m, seis bandas a 20 m, y tres bandas a 60 m (ESA 2015; Cuartero *et al.* 2023). Debido a la baja reflectividad del agua (Radin *et*

al. 2020), el proceso de corrección atmosférica para eliminar la contribución de la atmósfera a la radiación que le llega al satélite es fundamental en los estudios de calidad de agua por teledetección. Por tanto, se hizo uso de imágenes S2 con Nivel-L1C, es decir, reflectividades en el techo de la atmósfera con corrección geométrica. Luego, se aplica la corrección atmosférica específica para aguas para obtener reflectividades a nivel de superficie, y los productos automáticos derivados (Urrego *et al.* 2020).

Entre estos productos generados se encuentran las variables de especial interés para este estudio, que fueron las concentraciones de clorofila-a o Chl-a (*conc_chl*) en mg/m^3 , sólidos suspendidos totales o SST (*conc_tsm*) en g/m^3 , y el producto *kd_z90max*, que representa la profundidad, en metros, a la que se absorbe el 90% de la radiación solar incidente en la superficie del agua, siendo comparable a la profundidad de Disco de Secchi (DS) (Pompêo *et al.* 2021).

De las imágenes disponibles, se descartaron todas aquellas que presentaban nubosidad en la superficie del cuerpo de agua, por lo que finalmente se seleccionaron 41 imágenes desde el año 2016 a 2023.

Como datos de campo se utilizaron datos *in situ* de un estudio realizado por Chinga and Ramírez (2019) (Tabla 1), basados en muestras recolectadas en noviembre (época seca) y diciembre de 2017 (transición de seca a lluviosa) y en febrero y marzo de 2018 (época lluviosa). En ese estudio, las muestras fueron recolectadas en la parte media de la sección transversal del río a una profundidad de entre 1 y 1,5 metros. Se obtuvieron resultados de SST en g/m^3 y rangos de máximos y mínimos de Chl-a en mg/m^3 , a los que luego se les realizó una media aritmética. Posteriormente, ambas variables permitieron realizar una comparación con los resultados obtenidos mediante los productos automáticos.

Como se indica en el diagrama de procesos de la Figura 2, en primer lugar, las imágenes Sentinel-2 L1C descargadas fueron procesadas mediante el software SNAP (Sentinel Application Platform). SNAP es un software de código abierto proporcionado por la Agencia Espacial Europea (ESA), con varios módulos de herramientas para el procesamiento de productos Sentinel, así como de misiones de terceros (Occhipinti *et al.* 2023).

El proceso consistió en recortar todos los productos S2 de la zona de estudio. Luego, debido a que las bandas de Sentinel-2 poseen diferente resolución espacial, se les aplicó un *resampling* o remuestreo para obtener una resolución espacial de 20 m en todas las bandas. Posteriormente, se aplicó el proceso de corrección atmosférica para aguas Case 2 Regional Coast Colour (C2RCC), que es un método basado en redes neuronales artificiales sobre extensos sets de datos de entrenamiento con base en las propiedades ópticas inherentes del agua (IOP) (Ayala *et al.* 2023). SNAP cuenta con un módulo de corrección atmosférica C2RCC para S2 mediante tres versiones (C2RCC, C2X y C2X-COMPLEX). Los productos automáticos derivados de las tres versiones incluyen Chl-a, SST, y profundidad DS a través de *kd_z90max*.

Con el fin de calcular los productos automáticos de calidad de agua de cada imagen, se seleccionaron

zonas de interés (ROIs). Estas se trazaron evitando píxeles cercanos a las orillas, presencia de nubes, y reflejos (sunglint), obteniéndose así diferentes tamaños de estos. No obstante, se procuró que para la misma fecha se establezca el mismo tamaño de los ROIs.

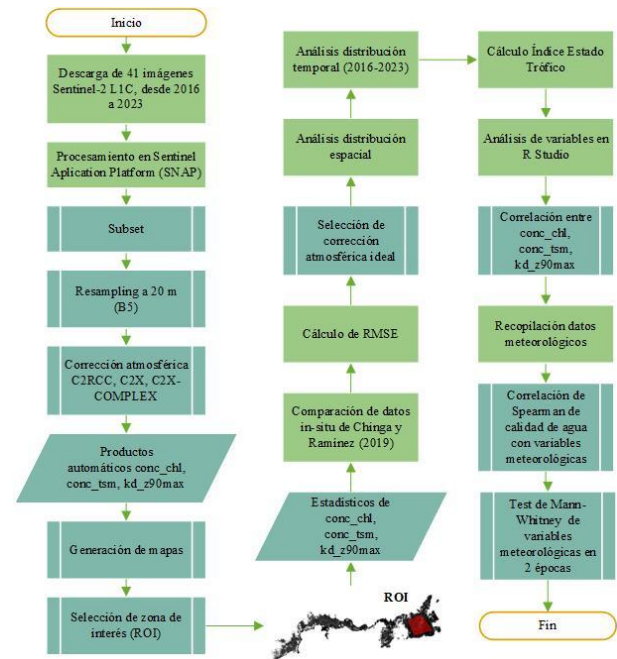


Figura 2: Diagrama de procesos de la metodología empleada en esta investigación.

Se generaron escenas con un tamaño de píxel de 20 m en proyección UTM Datum WGS84, zona 17S (EPSG 32717). Para cada producto automático proporcionado, se extrajo el valor medio, desviación estándar y número de píxeles de los ROIs seleccionados.

En base a los resultados obtenidos, se seleccionó la corrección atmosférica más adecuada entre las tres versiones existentes (C2RCC, C2X, C2X-COMPLEX). Con el propósito de tomar esta decisión, se consideró cuál se acercaba más a los datos recolectados *in situ* durante los meses de noviembre y diciembre de 2017, y febrero y marzo de 2018. Para lo cual, se evaluó la precisión de cada opción utilizando el error cuadrático medio (RMSE), mediante la Ec. (1). Esto con el fin de identificar la versión C2RCC apropiada para el estudio basándonos en el análisis de cuán lejos se encuentra la respuesta estimada, con respecto a la medida en campo (Villalba *et al.* 2022; Soriano *et al.* 2023):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i^{real} - x_i^{estimado})^2}{N}} \quad (1)$$

donde

x_i^{real} = Valores medidos en campo.

$x_i^{estimado}$ = Valores de los productos automáticos.

A partir de la versión seleccionada, se estudió la distribución espacial de las variables de la calidad del agua y se analizó la influencia de las diferentes actividades de la zona.

Tabla 1: Estadísticos de los datos *in situ* en el embalse Poza Honda en 2017-2018 (Chinga and Ramírez 2019).

Fecha	pH	Salinidad (g/l)	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	SST ($^{\circ}\text{C}$)	Clorofila-a (mg/m^3)
Noviembre	7,1	0,3	40,66	8,5	31,13-0,64
Diciembre	7,49	0,3	43,33	3,5	3,06-2,95
Febrero	7,06	0,3	43,10	10,5	64,89-5,28
Marzo	7,06	0,3	48,07	0,5	20,12-2,41

Posteriormente, se estudió de forma temporal el nivel de eutrofización del agua en el embalse mediante observación remota. Para tal fin, se analizó un periodo de 8 años, desde el 2016 hasta el 2023. Así también, se comparó los resultados con el Índice del Estado Trófico de Carlson modificado por Toledo (IETM), adaptado a ambientes tropicales y calculados mediante las siguientes ecuaciones (López and Madroñero 2015) (Ecs. 2-4):

$$IETMDS = 10(6 - \frac{0,64 + \ln(DS)}{\ln(2)}) \quad (2)$$

$$IETMChl"a" = 10(6 - \frac{2,04 - 0,695 \ln(Chl"a")}{\ln(2)}) \quad (3)$$

$$IETM \text{ Promedio} = (\frac{IETMDS + IETMChl"a"}{2}) \quad (4)$$

donde

IETMDS = Índice de estado trófico de Carlson modificado por Toledo con Disco Secchi.

IETMChl"a" = Índice de estado trófico de Carlson modificado por Toledo con Clorofila-a.

IETM Promedio = Índice de estado trófico de Carlson promedio modificado por Toledo.

Resultando valores adimensionales que se contrastaron con los criterios de aplicación mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2: Criterios de aplicación del IET, según Carlson (López and Madroñero 2015).

Valor Índice	Categoría trófica
< 30	Ultraoligotrófico
30-44	Oligotrófico
44-54	Mesotrófico
54-74	Eutrófico
> 74	Hipereutrófico

Además, se observaron las tendencias encontradas y se realizó la comparación con dos variables meteorológicas, la temperatura y precipitación. Para ello se utilizó información otorgada por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI), desde el año 2016 hasta el 2022, exceptuando a los años 2018, 2019 y 2023. Por último, se observaron las variaciones en las diferentes épocas (seca y lluviosa), y su posible incidencia en los parámetros de calidad de agua.

Para el análisis estadístico se empleó Excel y R Studio (versión 4.4.0). El primero se utilizó para elaborar gráficos de dispersión y evaluar la relación entre parámetros de calidad del agua (Chl-a, SST y profundidad de DS). R Studio permitió calcular el índice

de Spearman para analizar correlaciones significativas entre variables meteorológicas y parámetros de calidad del agua, además de aplicar el test de Mann-Whitney para identificar diferencias significativas según la precipitación y temperatura, considerando la época seca y lluviosa por separado.

3. Resultados y Discusión

3.1. Selección del método de corrección atmosférica

Se observó que las concentraciones de Chl-a y SST obtenidas con la versión C2RCC eran muy bajas, y para la profundidad de disco Secchi proporcionaba valores muy altos, contrastando en gran medida con los datos *in situ* y las demás versiones disponibles. Esto concuerda con los objetivos para los que fue diseñada esta versión, ya que, como señalan Ayala *et al.* (2023), es la red original que cubre rangos típicos de IOP en aguas costeras, y que tiene aplicaciones en aguas con baja turbidez como las aguas marinas y oceánicas, por lo que no resulta adecuada para cuerpos de agua con las características del embalse en estudio. Otras investigaciones coinciden con estos resultados mostrando que esta versión no es adecuada en aguas con valores de Chl-a mayores a 5 $\mu\text{g/L}$ aproximadamente (Delegido *et al.* 2019). Por tanto, se descartó esa versión.

Se analizaron los productos automáticos de C2X y C2X-COMPLEX, donde se obtuvo la media a partir de los ROI's, de cuatro fechas: 26 de noviembre, 21 de diciembre del 2017, 24 de febrero y 6 de marzo del 2018 (Tabla 3).

Tabla 3: Media de los productos automáticos C2X (V1) y C2X-COMPLEX (V2) en el embalse Poza Honda 2017-2018.

Fecha	Chl-a (mg/m^3)		SST ($^{\circ}\text{C}$)		DS (m)	
	V1	V2	V1	V2	V1	V2
26/11/2017	16,77	26,10	14,37	4,36	0,77	2,18
21/12/2017	3,28	32,20	9,40	0,42	1,17	5,93
24/02/2018	5,01	29,21	4,97	1,20	2,42	4,65
06/03/2018	2,07	40,96	0,68	0,64	8,26	4,59

La Tabla muestra que los resultados obtenidos con la versión C2X en general presentan rangos similares a los datos de campo (Tabla 1), donde se observan altos valores de Chl-a que coinciden con un aumento de los SST y una disminución en la transparencia. También se observa que, en los meses de noviembre y diciembre del año 2017, son más próximos al valor generado por la versión C2X. Estos valores de Chl-a, podrían asociarse a las diferentes actividades de la zona,

originados por los residuos de restaurantes, domicilios y zonas de cultivo.

En contraste, con la versión C2X-COMPLEX, la Tabla 3 muestra que cuando los valores de Chl-a aumentan, los SST no muestran un incremento, y la transparencia del agua mejora. Sin embargo, en febrero de 2018, esta versión logra una mayor aproximación a los valores medidos *in situ*. Daga *et al.* (2020) señalan que el parámetro de la transparencia del agua no siempre está influenciado por la presencia de algas, y que el tamaño de las células del fitoplancton puede tener un mayor impacto, destacando que estos parámetros son muy dinámicos y pueden estar influenciados por una variedad de factores.

Por lo tanto, para seleccionar la versión más apropiada, se evaluó el error cuadrático medio (RMSE) comparando los datos de Chl-a y SST generados por los modelos C2X y C2X-COMPLEX, con los datos *in situ* correspondientes a cuatro meses de 2017 y 2018.

Se encontró que, aunque no se obtuvo una coincidencia exacta con la recta 1:1, (Fig. 3) el modelo C2X presentó un menor error para el parámetro de clorofila-a, con un RMSE de 15,7 mg/m³, en comparación con el modelo C2X-COMPLEX, cuyo error fue de 21,6 mg/m³. Para el caso de los SST los cálculos manifestaron que el modelo C2X presentó menor RMSE con un valor de 5 g/m³, mientras que el modelo C2X-COMPLEX, mostró un error de 5,3 g/m³.

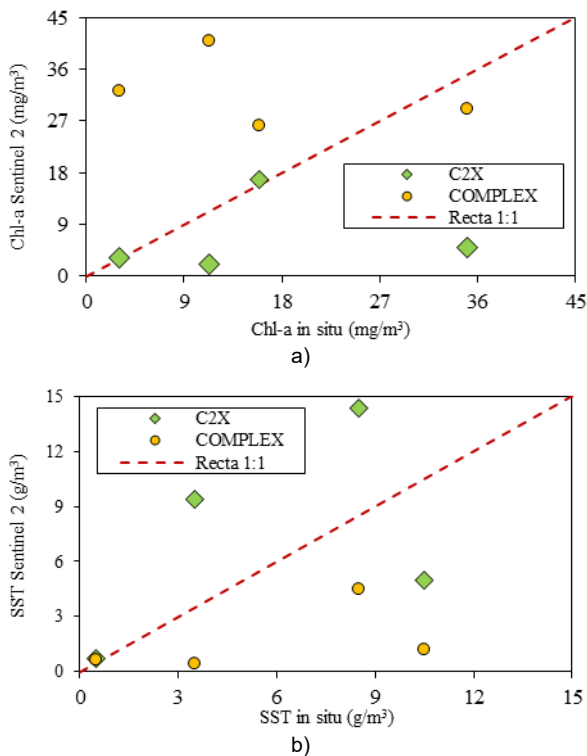


Figura 3: Productos automáticos obtenidos con Sentinel-2 en 2017-2018: a) Valores de Chl-a reales y pronosticados; b) Valores de SST reales y pronosticados.

A partir de los resultados anteriores, se infiere que la versión C2X muestra una mayor proximidad a los datos de campo tanto para la Chl-a como para los SST. Ayala *et al.* (2023) indican que estas redes neuronales, utilizan un conjunto de datos CoastColour para ampliar el rango

para aguas costeras, incluidos casos extremos, y se manejan para estudios en aguas continentales con altas concentraciones de material suspendido y clorofila.

Cabe mencionar que no se dispuso de datos *in situ* de la transparencia o profundidad de DS en el embalse Poza Honda, por lo cual no se pudo llevar a cabo el cálculo de RMSE para este parámetro.

En consecuencia, el modelo C2X fue la versión que mejor se adaptó a los resultados *in situ*, puesto que los productos automáticos de Chl-a y SST mostraron menor RMSE, razón por la cual fue seleccionado como la opción más adecuada para analizar las variables de calidad de agua en el embalse Poza Honda.

3.2. Análisis espacial

A fin de conocer la distribución espacial de los parámetros de la calidad de agua en el embalse Poza Honda, se eligió como ejemplo la imagen del 15 de mayo de 2016. Esta se procesó con la corrección atmosférica elegida anteriormente (C2X), y se generaron productos automáticos de Chl-a, SST, y profundidad de DS, con los cuales se realizaron mapas con sus respectivas escalas de colores (Fig. 4).

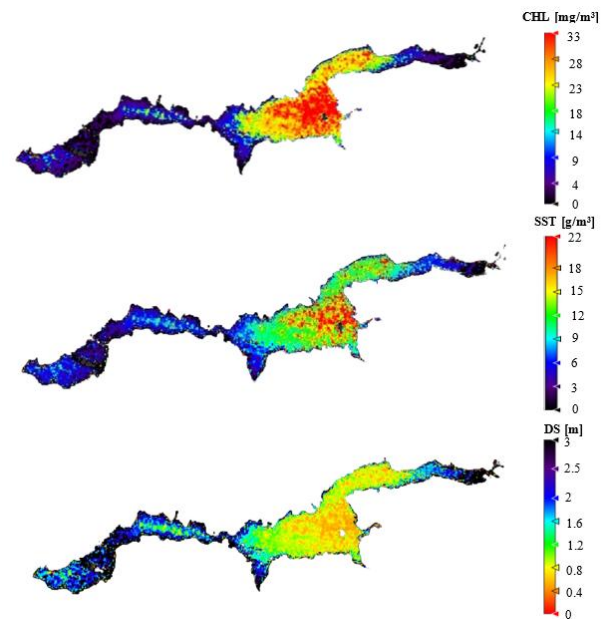


Figura 4: Mapas de concentración de Chl-a, SST, y profundidad de DS, en el embalse Poza Honda del 15 mayo de 2016.

Según esta figura, la distribución de la Chl-a en el embalse Poza Honda muestra valores de hasta 33 mg/m³, que se identifican por el color rojo predominando la parte céntrica del embalse y extendiéndose hasta la zona noreste. También se observa concentraciones de sólidos suspendidos totales de hasta 22 g/m³, y una transparencia en esta zona de menos de 1 m.

Alcívar (2021), indica que los habitantes de la zona contaminan el agua al arrojar desechos, lo cual, sumado a la existencia de ganados y cultivos, cuyos residuos se depositan en el agua, ocasiona diversas problemáticas como la escasez de peces y otras especies de vida fluvial, que formaban parte del ingreso familiar. El mismo autor señala que el embalse y el terreno aledaño

poseen forma cóncava lo cual permite que la precipitación recorra los extremos de la cuenca del río Portoviejo y desemboque al embalse. De manera que van a parar a este, residuos de agroquímicos, sedimentos, nutrientes y demás aportes orgánicos que provocan el crecimiento de macrófitos como el jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*). La Figura 5 muestra una composición en color obtenida con S2 el día 9 de julio de 2018 en la que se observa la presencia del macrófito.



Figura 5: Presencia de *Eichhornia crassipes* en el embalse Poza Honda el 09 de julio del 2018.

El jacinto de agua, también conocido como lechuguín o flor de agua, es una planta con un crecimiento acelerado que se ha convertido en una de las especies invasoras más alarmantes en los cuerpos de agua dulce de Ecuador. Su habilidad para formar densas alfombras flotantes que cubren la superficie acuática impide la penetración de la luz solar y altera la oxigenación del ecosistema acuático (Mera *et al.* 2024).

Debido a la presencia de *Eichhornia crassipes*, las 18 comunidades aledañas exhiben problemas en el ámbito de salud, ya que, el lechuguino al entrar en estado de putrefacción atrae mosquitos y la mosca verde, provocando enfermedades. Además, dificulta el paso de las canoas y demás transportes fluviales que se usan para el acceso a servicios de primera necesidad como la salud o educación (Alcívar 2021).

Como se observa en la Figura 6, la corrección atmosférica C2X aplicada a la imagen satelital del día 9 de julio de 2018 sólo muestra resultados en los píxeles de agua, mientras que excluye a los macrófitos debido a que los considera como vegetación.

Para esta fecha, donde se observa una gran cantidad de macrófitos en el embalse, la Figura 6 muestra concentraciones que varían desde los 22 a 40 mg/m³ de Chl-a en la parte oriental, de 12 a 30 g/m³ de SST, y de 0,2 a 0,8 m de transparencia DS en la misma zona.

Dueñas (2016), indica que la concentración de clorofila y la turbidez en el embalse Poza Honda muestran diferencias significativas entre los diferentes usos del suelo. Dentro de su investigación la concentración de clorofila-a del agua cercana a los bosques fue significativamente inferior a la de las zonas residenciales, y la turbidez fue mayor en zonas de cultivo.

3.3. Análisis temporal

Para el análisis temporal, se seleccionaron los datos medios en los ROIs trazados de los productos automáticos de Chl-a, SST y profundidad de DS generados por la versión C2X, correspondientes a un

periodo de ocho años (2016-2023). Posteriormente, se elaboró un gráfico de la serie temporal (Fig. 7). Como se observa en esta figura, los valores más elevados de clorofila se mostraron en el año 2019 con 38,6 mg/m³. Así también, las máximas concentraciones de SST se alcanzaron en el año 2020 con aproximadamente 25 g/m³. En cuanto a las concentraciones más bajas, se observan en el año 2022 para Chl-a, con 0,30 mg/m³ y 0,0027 g/m³ para SST. En el caso de la profundidad del disco Secchi, el valor más bajo se encontró en el año 2020 con alrededor de 0,4 m, mientras que la mayor profundidad del DS se observó el año 2022, con 13 m.

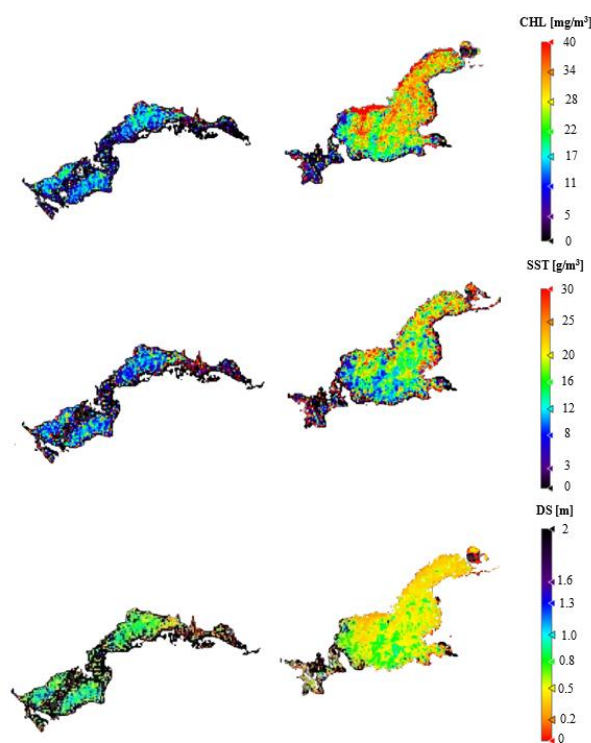


Figura 6: Variación de concentración de Chl-a, SST, y profundidad de DS, en el embalse Poza Honda el 09 de julio 2018.

Curiosamente, también se observó que, a lo largo de los años, existe una tendencia a la disminución en las concentraciones de Chl-a y SST, así como un ligero aumento en la profundidad de DS, especialmente en los años 2022 y 2023. Este comportamiento es respaldado por los ajustes lineales de las variables que se muestran en la Figura 7, donde la pendiente negativa fue de -0,24 para Chl-a sugiriendo una tendencia decreciente, aunque el modelo explica solo una pequeña parte de la variabilidad. De manera similar, la pendiente de -0,21 para SST indica una disminución en los SST a lo largo del tiempo. Por otro lado, el ajuste lineal para DS muestra una pendiente positiva de 0,13, lo que evidencia un cierto aumento en la transparencia del agua. Sin embargo, no se encontró información *in situ* que permita contrastar estos resultados con los datos obtenidos de los productos automáticos en los últimos años.

De acuerdo con los resultados obtenidos, al aplicar el Índice del Estado Trófico de la escala establecida por Carlson modificada por Toledo para aguas tropicales, puede considerarse que el embalse Poza Honda en el año 2016, 2017, 2018, 2019, 2020 y 2021, se

encontraba en un estado hipereutrófico y eutrófico. No obstante, para el año 2022 y 2023 se muestra como mesotrófico y oligotrófico.

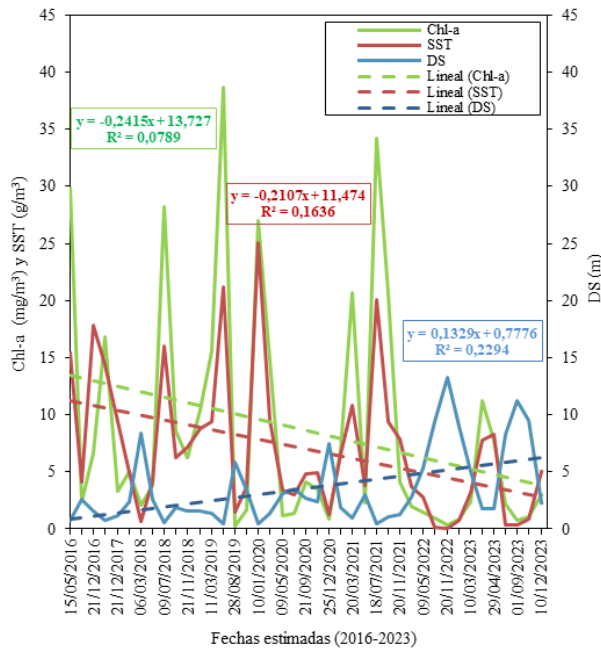


Figura 7: Promedios de la serie temporal de Chl-a (mg/m^3) y SST (g/m^3) en el eje de la izquierda, y $\text{kd}_{z90\text{max}}$ (m) en el eje de la derecha.

La fecha correspondiente a una mayor concentración de Chl-a (10 abril de 2019) alcanzó los 40 mg/m^3 , predominando la parte céntrica del embalse y extendiéndose hasta la zona noreste del mismo. Además, se observó concentraciones de 22 mg/m^3 en el tramo oeste. Por otro lado, la fecha con mayor cantidad de SST y reducida transparencia fue el 10 de enero del 2020, donde su distribución espacial fue similar a las demás fechas estudiadas.

De manera general, las lagunas que poseen mayor concentración de SST tienen una calidad de agua más baja. El aumento de SST se produce como resultado de los procesos combinados de erosión y transporte fluvial (Anurogo *et al.* 2023).

Según Alcívar (2021), la zona del embalse Poza Honda posee un alto grado de deforestación en sus bosques, provocando una acelerada erosión del suelo por sus laderas y el azolvamiento del vaso de la represa, disminuyendo también la capacidad de almacenamiento de las aguas represadas. Anurogo *et al.* (2023) asevera que esto puede tener un impacto en su calidad, reduciendo la vida útil del embalse, ya que, al mismo tiempo que se da la acumulación de partículas en suspensión disminuye la cantidad de luz que llega al interior del embalse.

La transparencia de los cuerpos de agua favorece el desarrollo de plantas acuáticas, fundamentales para la supervivencia de especies. La opacidad o turbidez del agua puede obstaculizar la fotosíntesis, repercutiendo negativamente en la vida acuática (Anurogo *et al.* 2023). Por consiguiente, conservar la transparencia del agua es crucial para mantener la diversidad biológica y la integridad de los ecosistemas acuáticos.

Según Bravo (2022), al aplicar un Índice de Calidad de Agua (ICA) durante 2017, 2018, 2019 y 2021 en el embalse, se encontró que la calidad del agua era media. Lo cual sugiere una menor diversidad de vida acuática y, con frecuencia, un crecimiento excesivo de algas.

Seguidamente, con el fin de estudiar la relación entre los parámetros de calidad del agua, se utilizó la media de los datos de C2X, obtenidos del promedio de los ROI. En los gráficos de dispersión mostrados en la Figura 8, los puntos representan la información de las 41 fechas seleccionadas durante el periodo 2016-2023.

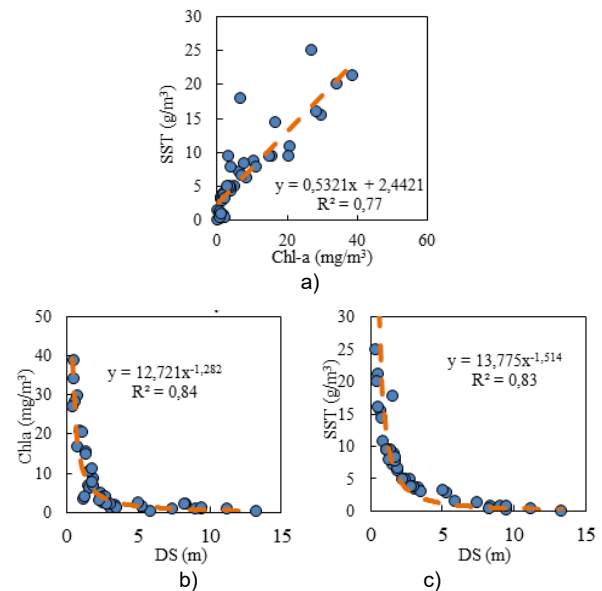


Figura 8: Relación entre los diferentes parámetros de calidad de agua estudiados: a) Correlación entre Chl-a y SST; b) Relación entre DS y Chl-a; c) Relación entre DS y SST.

En primer lugar, se observa que existe correlación entre la variable de Chl-a y SST. Así mismo, se muestra un ajuste lineal entre las variables, siendo R^2 de 0,77. Esto indica que el 77% de la variabilidad en SST puede explicarse por su relación lineal con la Chl-a.

Para la Chl-a y el DS, existe una relación de moderada a fuerte, presentando un valor de R^2 de 0,84 para un ajuste de tipo potencial. Denotando que un aumento en la concentración de clorofila, indica más fitoplancton, reduce la transparencia y por ende disminuye la profundidad del disco Secchi. Asimismo, se evidencia una fuerte relación inversa entre los SST y DS con un R^2 igual a 0,83.

3.4. Relación de la calidad del agua con variables meteorológicas

Para entender la dinámica de los resultados obtenidos por los productos automáticos, se mostraron gráficamente los datos de temperatura y precipitación desde el año 2016 al 2022 (Fig. 9), salvo los años 2018, 2019 y 2023 ya que el INAHMI, no contaba con los datos de estos años de la estación meteorológica cercana al embalse. La Figura 9 muestra que los años donde hubo mayor temperatura fueron 2016 y 2017 con $27,5^\circ\text{C}$ en los meses de marzo y febrero respectivamente (época lluviosa), mientras que los valores más bajos se dieron en el año 2022 con $24,3^\circ\text{C}$, en el mes de julio (época seca). En el caso de la

precipitación se observa que el mes con mayor precipitación fue marzo del 2021 con 297 mm, mientras que el año 2020 es el que muestra una menor precipitación anual.

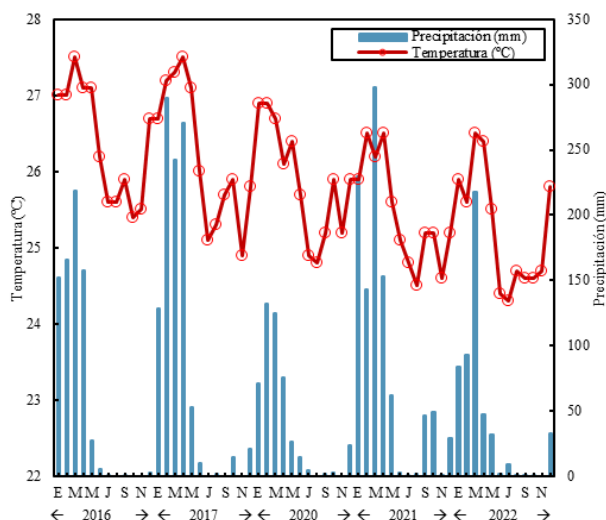


Figura 9: Datos meteorológicos mensuales de 2016, 2017, 2020, 2021 y 2022, obtenidos del INAHMI.

Además, curiosamente se evidencia una disminución de la temperatura a través de los años y aparentemente también un decrecimiento en las precipitaciones, pudiendo tener influencia en los diferentes parámetros de la calidad del agua en el embalse.

Se analizó la relación de las variables meteorológicas de temperatura y precipitación con los diferentes parámetros de calidad de agua estudiados, observándose que, al aumentar la temperatura, hay cierto aumento de la concentración de SST y de Chl-a. Para el caso de la transparencia, esta disminuye ligeramente al aumentar la temperatura; sin embargo, se observó también que no poseen una correlación lineal significativa, con un coeficiente de Spearman del 0,26 para Chl-a, 0,36 para SST, y -0,26 de DS. Esto sugiere que la relación entre estas variables y la temperatura es bastante tenue, no es consistente ni fuerte.

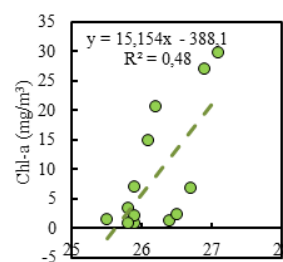
De forma similar, para la relación entre la precipitación y las tres variables de estudio no se observó una correlación lineal entre las variables, con un coeficiente de Spearman de 0,20 para Chl-a, SST de 0,13, y -0,14 de DS. Lo que refuerza la idea de que no hay una relación clara entre la precipitación y la Chl-a, SST y DS, por lo que otros factores pudieran estar influyendo.

Para estudiar el comportamiento de los parámetros de la calidad del agua en el embalse, distinguiendo entre la época seca y lluviosa, respecto a los valores de las variables meteorológicas, se calculó el promedio de cada variable en cada época.

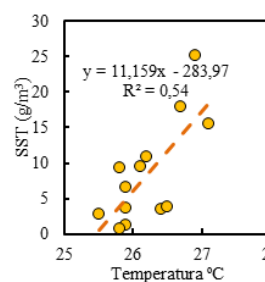
En la época seca se observó menor temperatura y, evidentemente, menos precipitaciones. Además, se observó que en el transcurso de este periodo los valores de Chl-a y SST son ligeramente menores, mientras que la transparencia aumenta. En cuanto a la época lluviosa, claramente se constata un aumento de los valores de Chl-a y SST y disminuye la transparencia del agua en el embalse. Sin embargo, de acuerdo al test de Mann-Whitney no existe una diferencia estadísticamente

significativa entre los datos de la época seca y lluviosa para las variables, dando un valor p de 0,34, que es mayor al umbral de significancia (0,05).

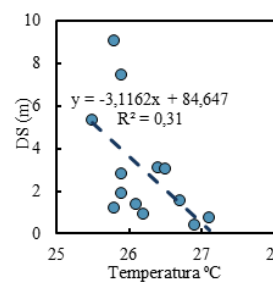
Al analizar por separado la relación entre los parámetros de calidad del agua y las variables meteorológicas, sólo tomando los datos de la época seca, se observó que no existía una correlación entre ellas. Sin embargo, para el caso específico de la época lluviosa (Fig. 10), al analizar la relación entre la temperatura y las demás variables, se halló que el 48% de la variabilidad en la Chl-a se atribuye a cambios en la temperatura. De igual forma para los sólidos suspendidos con un 54%, sugiriendo una relación moderada entre ambas variables. En cambio, para la transparencia se obtuvo un R^2 de 0,31, es decir que entre estas variables existe una correlación débil a moderada, lo que implica que la temperatura no es un factor dominante en la transparencia.



a)



b)



c)

Figura 10: Correlación entre la temperatura (°C) para la época de lluvias con los siguientes parámetros: a) Chl-a (mg/m³); b) SST (g/m³); c) DS (m).

Cabe destacar que, con el incremento de las lluvias, se dan cambios considerables en algunos de los parámetros; aumenta la temperatura lo que afecta en forma directa a la solubilidad de los gases, de sales y por lo tanto la conductividad, el pH y cambios en el color del agua (Sarda and Surgir 2015). Con el aumento de la temperatura, aumenta también el crecimiento bacteriano la presencia de sólidos suspendidos totales, y disminuye el oxígeno disuelto (Van Vliet 2023).

Por otra parte, se analizó la relación entre las variables de calidad del agua y la precipitación en la época lluviosa. Los resultados mostraron que las variables Chl-a, SST y DS no son estadísticamente significativas en relación con la precipitación.

4. Conclusiones

Tras comparar los datos de campo con los productos automáticos, se observó que la versión C2X es la más adecuada.

Se analizó la distribución espacial de Chl-a, SST y profundidad de DS, mostrando que en general existe una mayor concentración de Chl-a y TSS en la parte media y margen oriental del embalse, proliferando en ciertas fechas el crecimiento de macrófitos como la *Eichhornia crassipes*.

Se observó que el año con mayor concentración de Chl-a en el embalse fue 2019, alcanzando una concentración de 38,6 mg/m³. Las concentraciones más altas de SST y más bajas de DS se obtuvieron en el año 2020 con 25 g/m³, y 0,41 m respectivamente. Por otra parte, los valores más bajos se mostraron en el año 2022 con 0,30 mg/m³ para Chl-a, 0,0027 g/m³ para SST y 13 m para profundidad de DS.

Según el índice del estado trófico, el embalse Poza Honda en el periodo 2016 - 2021, se encontraba en un estado hipereutrófico y eutrófico. Para los años 2022 y 2023 el estado mejora pasando a mesotrófico y oligotrófico.

Se demostró que existe correlación lineal entre las variables Chl-a y SST, siendo R² de 0,77. Para el caso de la Chl-a y el DS, existe una relación inversa de moderada a fuerte, con un R² de 0,84. De igual forma se observa una relación inversa fuerte entre los SST y DS con un R² igual a 0,84.

Se observó que, en la época seca, los valores de Chl-a y SST disminuyen y DS aumenta, mientras que, en la época lluviosa los valores de Chl-a, SST son mayores y disminuye el DS. No obstante, de acuerdo al test de Mann-Whitney no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los datos de la época seca y lluviosa.

Además, para el caso específico de la época lluviosa, la relación entre la temperatura y las variables de calidad del agua, mostró que el 48% de la variabilidad en la Chl-a, el 54% de SST, y el 31% de DS, se atribuye a cambios en la temperatura.

References

- ALCÍVAR, V., 2021. Medidas de Mitigación sobre el Impacto Ambiental Causado por Efluentes y el Lechuguin (*Eichhornia crassipes*) en el Embalse de Poza Honda del Cantón Santa Ana de Vuelta Larga, Provincia de Manabí. Master's Thesis, Universidad Laica Eloy Alfaro De Manabí. Available: <https://repositorio.uleam.edu.ec/handle/123456789/4348> [29/09, 2024]
- ANUROGO, W., GAYATRI, G., FAUZI, M., LUBIS, M., and GHAZALI, M., 2023. Waters Quality Assessment on Physical-Chemical Parameters Using Remote Sensing Technologies: Criteria for Total Suspended Solids and Waters Transparency. In *Proceedings of the 5th International Conference on Applied Engineering*, ICAE 2022, 5 October 2022, Batam, Indonesia. DOI: 10.4108/ea1.5-10-2022.2329739
- AYALA, J., BELTRÁN, A., JARA, C., GODOY, S., VAN, S., VERRELST, J. and DELEGIDO, J., 2023. Spatial and Temporal Analysis of Water Quality in High Andean Lakes with Sentinel-2 Satellite Automatic Water Products. *Sensors*, **23**(21). DOI: 10.3390/s23218774
- BARRETO, A., FLOR, J., SANTANA, F., PICO, J., TRUEBA, S. and BRAVO, R., 2018. Crecimiento y producción del maíz, *Zea mays* L. en huertos biointensivos y convencionales en Lodana, Manabí, Ecuador. *Revista Ciencia e Investigación*, **3**(4), pp. 3–7.
- BERNAL, D., 2023. Análisis bibliométrico de la producción científica sobre fósforo y nitrógeno en ecosistemas acuáticos ecuatorianos, periodo 2000-2019. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, (1), pp. 79-95. DOI: 10.26423/rctu.v10i1.735
- BRAVO, S., 2022. Análisis Multitemporal Índice Calidad Del Agua (ICA) Cuenca Río Portoviejo. *UTCiencia*, **9**(1), pp. 1-9. Available: <http://investigacion.utc.edu.ec/index.php/utciencia/article/view/385> [29/09, 2024]
- CHINGA, J. and RAMÍREZ, C., 2019. Evaluación de la variabilidad espacio temporal de la comunidad Fito planctónica en el río Portoviejo como indicadores biológicos de la calidad de agua. Degree thesis, Universidad de Laica Eloy Alfaro de Manabí. Available: <https://repositorio.uleam.edu.ec/bitstream/123456789/3106/1/ULEAM-RNA-0072.pdf> [29/09, 2024]
- COPERNICUS, 2024. Copernicus Browser. Available: <https://browser.dataspace.copernicus.eu> [29/09, 2024]
- CORAL, B., 2021. Sostenibilidad de recursos hídricos y transformaciones en modelos agrarios comunales en Ecuador. El caso de Poza Honda 1970-2010 Manabí Ecuador: un caso desde el análisis de la economía institucional. [tesis doctoral, Universidad de Valladolid]. Available: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/51981> [29/09, 2024]
- CUARTERO, A., CÁCERES, J. and TORRECILLA, J., 2023. An application of C2-Net atmospheric corrections for chlorophyll-a estimation in small reservoirs. *Remoting Sensing Applications: Society and environment*, **32**. DOI: 10.1016/j.rsase.2023.101021
- DAGA, I., FERNÁNDEZ, M. and REYNA, S., 2020. Composición algal y bioindicadores de calidad de agua. Caso de estudio: Embalse San Roque, Córdoba, Argentina. *Cuadernos del Curiham*, **26**, pp. 1-11. Available: <http://hdl.handle.net/2133/19917> [29/09, 2024]
- DELEGIDO, J., URREGO, P., VICENTE, E., SÒRIA- PERPINYÀ, X., SORIA, J., PEREIRA-SANDOVAL, M., RUIZ-VERDÚ, A., PEÑA, R., and MORENO, J., 2019. Turbidity and Secchi disc depth with Sentinel-2 in different trophic status reservoirs at the Comunidad Valenciana. *Revista de Teledetección*, **54**, pp. 15-24. DOI: 10.4995/raet.2019.12603

- DUEÑAS, J., 2016. Ecological assessment of Portoviejo river basin (Ecuador). Masther's Thesis, Universiteit Gent. Available: https://libstore.ugent.be/fulltxt/RUG01/002/305/139/RUG01-002305139_2016_0001_AC.pdf [29/09, 2024]
- ESA, 2015. ESA Standard Document: SENTINEL-2 User Handbook. Available: https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook [29/09, 2024]
- GARCÍA-NIETO, P.J., GARCÍA-GONZALO, E., FERNÁNDEZ, J.R.A., and MUÑIZ, C.D., 2024. Forecast of chlorophyll-a concentration as an indicator of phytoplankton biomass in El Val reservoir by utilizing various machine learning techniques: a case study in Ebro river basin, Spain. *Journal of Hydrology*, **639**, 131639. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.131639
- MERA, M., ZAMORA, E. and ZAMBRANO, J., 2024. Gestión socioambiental y estrategias para el control de especies macrófitas invasoras en embalses: perspectivas nacionales y regionales. *Revista Científica Sapiientiae*, **7**(13), pp. 71-103. DOI: 10.56124/sapiientiae.v7i13.0006
- NOLIVOS I., VILLACIS M., VÁZQUEZ R., MORA D.E., DOMÍNGUEZ-GRANDA L., HAMPEL H. and VELARDE E., 2015. Challenges for a sustainable management of Ecuadorian water resources. *Sustainability of Water Quality and Ecology*, **6**, pp. 101–106. DOI: 10.1016/j.swaqa.2015.02.002
- OCCHIPINTI, M., CARBONI, F., AMORINI, S., PALTRICCIA, N., LÓPEZ-MARTÍNEZ, C. and PORRECA, M., 2023. Implementing the European Space Agency's SentiNel Application Platform's Open-Source Python Module for Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry Coseismic Ground Deformation from Sentinel-1 Data. *Remote Sensing*, **16** (48). DOI: 10.3390/rs16010048
- POMPÊO, M., MOSCHINI, V., DANTAS, M., SÒRIA, X., VICENTE, E. and DELEGIDO, J., 2021. Water quality assessment using Sentinel-2 imagery with estimates of chlorophyll a, Secchi disk depth, and Cyanobacteria cell number: the Cantareira System reservoirs (São Paulo, Brazil). *Environmental Science and Pollution Research*, **28**, pp. 34990-35011. DOI: 10.1007/s11356-021-12975-x
- LÓPEZ-MARTÍNEZ, M.L. and MADROÑERO-PALACIOS, S.M., 2015. Estado trófico de un lago tropical de alta montaña: caso laguna de La Cocha. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, **25**(2), pp. 21-42. DOI: 10.18359/rcin.1430
- RADIN, C., SÒRIA-PERPINYÀ, X. and DELEGIDO, J., 2020. Estudio multitemporal de calidad del agua del embalse de Sitjar (Castelló, España) utilizando imágenes Sentinel-2. *Revista De Teledetección*, **56**, pp. 117-130. DOI: 10.4995/raet.2020.13864
- RAMOS, M., GARCÍA, H., FRANÇA, A., BATISTA, A., MANRIQUE, T. and ESTÉVEZ, I., 2021. Ocurrencia de incendios forestales en el cantón Santa Ana, provincia de Manabí, Ecuador (2012-2018). *Revista Cubana De Ciencias Forestales*, **9**(3), pp. 322–339. Available: <https://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/687> [29/09, 2024]
- SARDA, P. and SURGIR, P., 2015. Assessment of Multi Parameters of Water Quality in Surface Water Bodies-A Review. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, **3**, pp. 331-336. Available: <http://www.ijraset.com/files/serve.php?FID=3180> [29/09, 2024]
- SORIANO, P., GRACIA, D., FERRERO, L., IÁÑEZ, E., ORTIZ, M. and AZORÍN, J., 2023. Study of the variability of single trial error potential in relation to P300 and N500. *XLIV Jornadas de Automática*, pp. 116-120. DOI: 10.17979/spudc.9788497498609.116 [29/09, 2024]
- URREGO, P., PASQUALOTTO, N. and DELEGIDO, J., 2020. Introducción a la teledetección y aplicaciones medioambientales del programa europeo Copernicus. Calidad de aguas continentales. Available: https://www.copernicus-user-uptake.eu/fileadmin/FPCUP/dateien/resources/2018-2-23/Tutorial_Copernicus_2020_Oporto_03.pdf [29/09, 2024]
- VAN VLIET, M., THORSLUND, J., STOKAL, M., HOFSTRA, N., FLÖRKE, M., EHALT MACEDO, H., NKWASA, A., TANG, T., KAUSHAL, S., KUMAR, R., VAN, G., BOUWMAN, L. and MOSLEY, L.M., 2023. Global river water quality under climate change and hydroclimatic extremes. *Nature Reviews Earth & Environment*, **4**(10), 687-702. DOI: 10.1038/s43017-023-00472-3
- VILLALBA, N., ALCHAPAR, R., MERCADO, PATTINI, A., and CORREA, E., 2022. Desarrollo de un método simplificado para la cuantificación de reflectancia visible. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, **48**, pp. 65–72. Available: <http://hdl.handle.net/11336/203204> [29/09, 2024]

TÉCNICAS FOTOGRAMÉTRICAS PARA EL ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE ELEMENTOS PRESENTES EN UN CAMPO DE ESTRUCTURAS DE IMPACTO LOCALIZADO EN LA COMUNIDAD VALENCIANA

PHOTOGRAMMETRIC TECHNIQUES FOR THE STUDY AND CHARACTERIZATION OF FEATURES PRESENT IN A IMPACT STRUCTURES FIELD LOCATED IN THE VALENCIAN COMMUNITY

Eduardo Loma-Ossorio Blanch*, José Luis Lerma

Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España. , edlobla@doctor.upv.es; , jlerma@cgf.upv.es

How to cite: E. Loma-Ossorio-Blanch y J.L. Lerma. 2025. Técnicas fotogramétricas para el estudio y caracterización de elementos presentes en un campo de estructuras de impacto localizado en la Comunidad Valenciana. En libro de actas: *Quinto Congreso en Ingeniería Geomática*. Valencia, 2 – 3 de Julio de 2025. <http://dx.doi.org/10.4995/CIGeo2025.2025.19862>

Resumen:

En el siguiente se muestra la utilidad de la fotogrametría para la documentación de la geometría de las estructuras y rocas existentes en un posible campo de impactos de asteroides localizados en el interior de las provincias de Castellón y Valencia (España). La necesidad de compartir la información obtenida durante las observaciones sobre el terreno con el mayor detalle posible con investigadores especializados en este campo se consigue perfectamente con la modelización en 3D mediante estas técnicas geomáticas. La variabilidad de las dimensiones de los parajes, estructuras y objetos a modelizar obliga a utilizar metodologías de captura de imágenes diferentes, como el uso de RPAS (Sistemas de aeronaves pilotados a distancia), fotogrametría sobre el terreno, fotografía de alta resolución en estudio y utilización de microscopios con iluminación controlada. La información obtenida se ofrecerá de forma digital en diferentes formatos 3D junto a la documentación como planos, fotografías y vídeos en unas fichas informáticas ubicadas en la web del proyecto de forma que su consulta y análisis sea lo más sencilla posible.

Palabras clave: Geomática, Cartografía, Fotogrametría, Modelización 3D, Estructuras de impacto

Abstract:

The following study demonstrates the usefulness of photogrammetry for documenting the geometry of structures and rocks existing in a potential asteroid impact field located inland between the provinces of Castellón and Valencia (Spain). The need to share the information obtained during field observations in the greatest possible detail with researchers specialised in this field is perfectly achieved with 3D modeling using these geomatics techniques. The variability in the dimensions of the sites, structures, and objects to be modeled requires the use of different image capture methodologies, such as RPAS (Remotely Piloted Aircraft Systems), field photography, high-resolution studio photography, and the use of microscopes with controlled lighting. The information obtained will be offered digitally in different 3D formats, along with traditional documentation such as plans, photographs, and videos, in computer files located on the project website, making their consultation and analysis as easy as possible.

Key words: Geomatics, Cartography, Photogrammetry, 3D Modelling, Impact Structures

1. Antecedentes

El hallazgo fortuito de una serie de rocas con claros signos de haber sufrido metamorfosis de impacto llevan a realizar una búsqueda sistemática mediante cartografía digital de estructuras compatibles con un evento de este tipo en la comarca del Alto Palancia, al sur de la provincia de Castellón (French and Koeberl 2010; Osinski and Pierazzo 2013). Se detectan diferentes parajes geológicos singulares alineados entre sí y orientados todos en la misma dirección compatibles

con un supuesto campo de estructuras de impactos de asteroide ocurrido posiblemente hace miles o millones de años (Fig. 1). Al ser un terreno montañoso la mayoría de las estructuras formadas no son circulares sino que tienen formas irregulares, están medianamente erosionadas y parcialmente ocultas por la vegetación siendo quizás éstos los motivos por los que no hayan sido identificados hasta el momento (Díaz-Martínez 2004; Sánchez-Garrido *et al.* 2022).

La Tierra, igual que el resto de planetas del sistema Solar, ha recibido a lo largo de su existencia millones de

* Corresponding Author: Eduardo Loma-Ossorio Blanch, edlobla@doctor.upv.es

impactos de cuerpos menores que orbitan junto a ellos alrededor del Sol y que son los restos de su formación (Fazio *et al.* 2014; French 1998). Estos cuerpos rocosos son asteroides y cometas que se concentran en diferentes zonas del Sistema Solar como el cinturón de asteroides, el cinturón de Kuiper y la nube de Oort, pero que en ocasiones cruzan las órbitas de los planetas e impactan contra ellos.

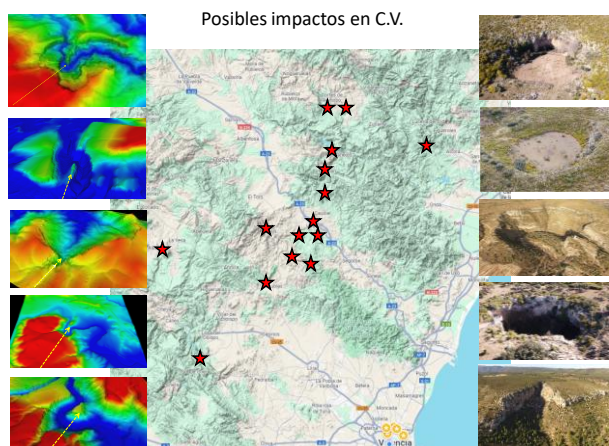


Figura 1: Zona del Levante Español con posibles estructuras de impacto de asteroide.

Los cráteres de impacto son el resultado de estas colisiones y en los planetas rocosos llenan sus superficies y son fáciles de observar mediante las imágenes de satélite, o en el caso de la Luna con unos simples prismáticos. En Marte, por ejemplo, se han contabilizado 384.000 cráteres de impacto, 42.000 de ellos con diámetros superiores a 5 km (Robbins and Hynek 2012), mientras que en la Luna se encuentran unos 9.000 cráteres, aunque análisis llevados a cabo con inteligencia artificial elevan ese número a 100.000 estructuras de impacto (Ali-Dib and Kristen 2020).

En la Tierra, sin embargo, hay confirmados únicamente 196 cráteres de impacto de asteroide, pero ninguno de ellos se encuentra en la Península Ibérica (Díaz-Martínez 2004; Sánchez-Garrido *et al.* 2022; Ernstron *et al.* 2002). El registro de los cráteres de impacto terrestres se realiza en la *Earth Impact Database (EID)* del *Planetary and Space Science Centre (PASSC)* y en muchos de ellos no se observa el cráter resultante de la colisión ya que la erosión los ha eliminado (Schmieder and Kring 2020; Hergarten and Kenkmann 2015).

Los motivos de que en la Tierra el número de cráteres sea tan reducido se debe a varios factores: el principal de ellos es la acción erosiva de los agentes atmosféricos, tanto la lluvia como el viento y el hielo han eliminado muchas de las marcas de antiguos impactos (French and Koeberl 2010). Otros factores son la dinámica de placas y los movimientos orogénicos, la acción erosiva de la vegetación y de sus incendios, la actividad humana y de la fauna. También la acción protectora de la propia atmósfera que desintegra y reduce el tamaño de los asteroides y meteoroides que entran a hipervelocidad (>17 km/s) en ella y evitan muchos pequeños impactos de objetos de diámetros inferiores a 20 m (Bland and Artemieva 2006).

Diferentes estudios demuestran que, a pesar de la acción de los anteriores agentes erosivos, en la Tierra

quedan miles de impactos por localizar. El registro de impactos de mayor tamaño está completo, pero en los impactos de tamaño inferior a 10 km quedan todavía cientos o miles de impactos por descubrir (Kenkmann 2021; Osinski *et al.* 2022). Según estos estudios los especialistas deberían de renunciar a la búsqueda de los más grandes y centrarse en encontrar los más pequeños.

2. Objeto del proyecto

El proyecto consta de tres apartados fundamentales:

1. Realización de búsquedas automatizadas de nuevas estructuras mediante la aplicación de técnicas informáticas de procesado sobre cartografía digital. Se realiza una primera etapa de preprocesado de la información facilitada por el IGN para obtener la representación de los desniveles adecuados según el tipo de terreno. El ajuste de este paso se realiza de forma manual para conseguir el mayor resalte. La segunda etapa se realiza mediante rutinas programadas en Python mediante IA. Se cruzan dos parámetros, concentración de desniveles seleccionados y convexidad del terreno entre ellos (Fig. 2). De este modo se proponen zonas a analizar para su estudio con el modelo digital del terreno (MDT). Se descartaron técnicas de aprendizaje automático, debido a la gran variedad de morfologías posibles, y tampoco se utilizan técnicas de estudio por patrones fractales (Berganzo-Besga and Orengo 2021).



Figura 2: Detección automática de posibles estructuras de impacto. Se utiliza cartografía digital para seleccionar las zonas con características adecuadas mediante una serie de rutinas en Python.

2. Validación de dichas estructuras mediante la utilización diferentes de medios analíticos. Se han utilizado diferentes técnicas analíticas: difracción de rayos X, espectroscopía Raman y microscopía electrónica (Fig. 3). También se ha utilizado microscopía óptica, tanto reflejada como transmitida de luz polarizada cruzada (Ferrière *et al.* 2008). Se han analizado diferentes minerales para localizar en ellos metamorfismo de impacto como son las deformaciones planares y los polimorfos de altas presiones. Los resultados han sido positivos por lo que varias de las estructuras han quedado validadas como provocadas por un evento de impacto (Campanale *et al.* 2011). Otros métodos analíticos utilizados para la detección de metamorfismo de impacto en rocas y minerales son la microscopía óptica con luz reflejada y la microscopía de luz polarizada transmitida o microscopía petrográfica. En este caso se precisa la preparación de las muestras en forma de láminas delgadas de 30 micras de espesor (Spray and Boonsue 2018) (Fig. 4).

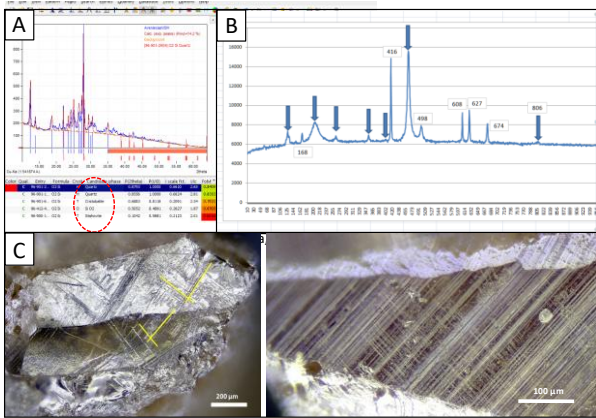


Figura 3: Resultados obtenidos con las técnicas analíticas: a) Difractograma con detección de trazas de coesita y stishovita en cristales de cuarzo; b) Espectro Raman con detección de cuarzo diaplético y posiblemente Lonsdaleita; c) Estructuras con deformaciones planares del cuarzo, PDFs.

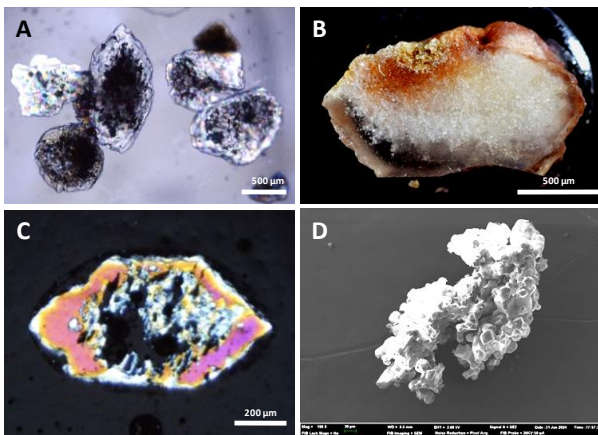


Figura 4: Observaciones realizadas mediante diferentes técnicas microscópicas: a) Microscopía de luz transmitida nicols paralelos; b) Microscopía de luz reflejada con iluminación polarizada para reducir reflejos; c) Microscopía de luz polarizada a nicols cruzados; d) Microscopía electrónica FESEM.

3. Caracterización de las estructuras y demás elementos presentes en el terreno, con la mayor precisión posible, para su difusión y estudio por parte de otros equipos de especialistas. La documentación de las estructuras mediante videos y fotografías aéreas obtenidas por RPAs se consideran de gran utilidad por lo que en el proyecto se realizan vuelos en todas las estructuras estudiadas para obtener videos en alta resolución 4K, fotografías en 12 MP y fotografías panorámicas y esféricas obtenidas por el dron (Serna 2019). Otra metodología utilizada y que se considera de gran utilidad es la realización de video 360° mediante cámaras que capturan video en todas las direcciones obtenidas en este caso, mediante una cámara *Samsung Gear 360* suspendida del dron y que aporta videos interactivos reproducibles con el Visualizador *Películas y TV* de Windows 10 (Fig. 5).

Este artículo se centra principalmente en el tercer apartado del proyecto. En concreto, en la caracterización de elementos singulares mediante técnicas fotogramétricas a diferentes escalas. Se

presentarán ejemplos de captura en 3D de diferentes estructuras y objetos característicos según sus dimensiones.

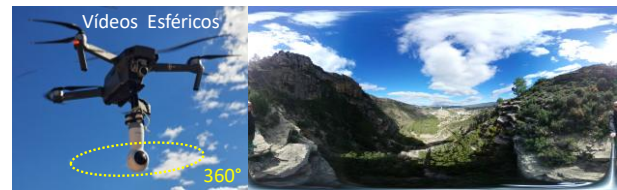


Figura 5: Vídeos 3D obtenidos mediante una cámara GEAR 360 de Samsung y cuya imagen se puede orientar durante la reproducción mediante el uso del ratón en todas direcciones.

3. Caracterización fotogramétrica

Con la intención de documentar las morfologías de los parajes y elementos localizados con la mayor precisión posible se aplican diferentes técnicas fotogramétricas según la escala de los elementos a caracterizar. El software utilizado para realizar los levantamientos es *Agisoft Metashape Professional* y los UAVs utilizados han sido un Mavic Pro para los vuelos automatizados y un Mini 3 de DJI para los vuelos manuales de mayor precisión (Serna 2019; Espinoza *et al.* 2022).

Los modelos obtenidos se clasifican por su tamaño en cinco grupos que precisan técnicas de fotografiado diferentes:

- A. Tamaño grande, que cubren extensiones de 30 a 300 m de diámetro. Las capturas se realizan mediante vuelos automáticos de UAVs a diferentes Alturas donde mediante el software *Pix4D* se determina el detalle y solape a conseguir con las fotografías, el ángulo de las cámaras y el tipo de lecturas paralelo o cruzado. También se muestran ejemplos de capturas de elementos verticales de hasta 150 m de altura (Fernández-Lozano and Gutiérrez-Alonso 2016). La Figura 6 muestra la captura de estructuras de grandes dimensiones.

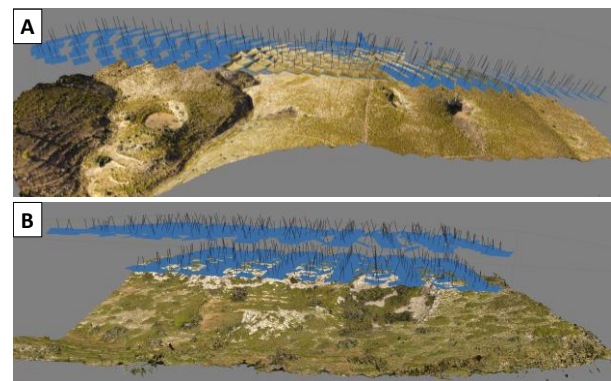


Figura 6: Captura de estructuras de grandes dimensiones: a) Grupo de impactos en Sacañet de 820 m de longitud y capturada con 323 imágenes y una resolución de 2.79 cm/px; b) Captura del cráter doble en Teresa, Castellón, de 198 x 137 m, con vuelo a dos niveles y 483 fotografías.

En los lugares en los que no se puede automatizar la captura de la geometría a través de software es necesario realizar las tomas mediante vuelos manuales, para ello se programa la toma de imágenes de forma secuencial en el software de DJI y mediante un plan de vuelo predeterminado

intentar cubrir toda la zona a capturar con el solape adecuado entre imágenes que se estima al menos un 60%. Se recomienda realizar tomas manuales de los detalles importantes para aumentar la resolución en esos lugares (Di Stefano *et al.* 2020). La Figura 7, muestra capturas verticales mediante vuelos manuales.

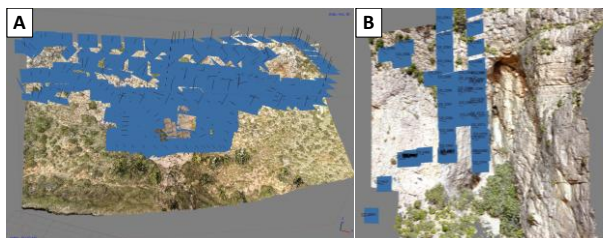


Figura 7: Vuelos fotogramétricos de geometrías verticales grandes realizados con disparos secuenciales y manuales: a) Estructura de Peñas Rubias en Viver con vuelos a diferentes distancias y 562 fotografías; b) Vuelo en la Megabrecha de Montanejos de 100 m de altura y con disparo secuenciado de 432 fotografías de 12 MP.

- B. Tamaño medio, que cubre extensiones de 5 a 30 m. Las capturas se realizan mediante vuelos manuales para obtener las características de los elementos con el mayor detalle posible ya que suelen tener geometrías complicadas o de difícil acceso. La Figura 8 muestra ejemplos de vuelos fotogramétricos de geometrías de dimensiones medias.

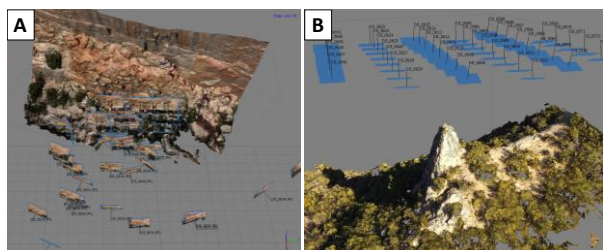


Figura 8: Vuelos fotogramétricos de geometrías de dimensiones medias: a) Megabrecha en Chulilla; b) Domo de megabrecha en El Paúl.

- C. Tamaño macro con elementos de 0.5 a 5 m. Las capturas se han realizado sobre el terreno de forma manual mediante desplazamiento sobre la zona y desde diferentes ángulos. Se utilizan cámaras reflex (DSLR) o sin espejo (*mirrorless*) y objetivos macro principalmente. La Figura 9 muestra capturas fotogramétricas manuales tanto con dron como con fotografía manual.

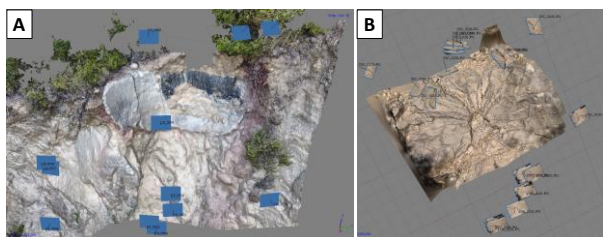


Figura 9: Capturas fotogramétricas manuales: a) Pequeña estructura de impacto de 5 x 5 m en posición vertical obtenida mediante vuelo manual; b) Captura de cono de impacto de 3 x 2 m en zona accesible realizada mediante fotografía manual sin generación de sombras sobre el modelo.

- D. Tamaño macro-centimétrica con elementos de 0.5 a 50 cm. Las capturas se realizan en estudio mediante la rotación del modelo. Se utiliza el efecto de luz polarizada cruzada para reducir los reflejos y mejorar la nitidez. Se utilizan objetivos macro y apilado de imágenes para la reducción del ruido. Se utilizará una plataforma giratoria, manual o automatizada. En ocasiones se puede realizar la captura girando sobre el modelo a diferentes distancias. La Figura 10 muestra ejemplos de capturas fotogramétricas manuales realizadas en estudio.

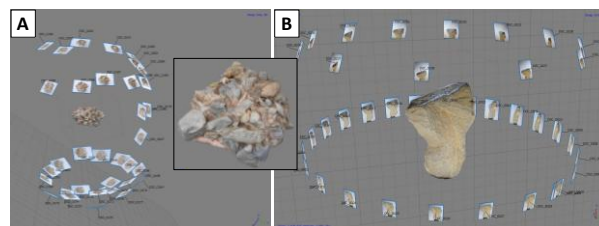


Figura 10: Ejemplos de capturas fotogramétricas: a) Brecha de impacto con captura de la geometría completa; b) Cono de impacto montado en plataforma giratoria automática y capturado con trípode a dos alturas diferentes.

- E. Tamaño micro, con elementos de 1 a 5 mm. Se realizan técnicas de apilado fotográfico por enfoque y de rotación del modelo con dispositivos abatibles de precisión, con técnicas de fotografía macro extremo o microscopios digitales. Se realizan disparos manuales sobre plataformas giratorias horizontales o abatibles de precisión. Se utiliza luz polarizada cruzada, es fundamental la utilización de filtros polarizados en el objetivo del microscopio y en las fuentes de iluminación para evitar los reflejos (Fig.10). En ocasiones cada toma micrográfica está compuesta mediante la unión de un grupo de imágenes enfocadas mediante un micrómetro y apiladas mediante el software *Zerene Stacker*.

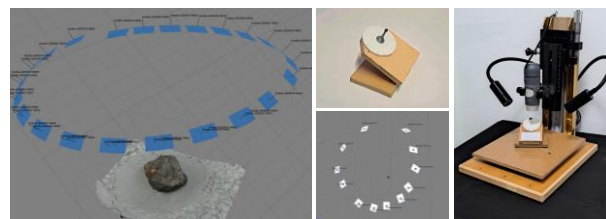


Figura 11: Fotogrametría de elementos milimétricos.

Todas las imágenes obtenidas mediante las diferentes técnicas fotogramétricas se procesan informáticamente.

4. Ubicación de la documentación

La información generada de cada estructura se mostrará en fichas informáticas de forma que facilite su consulta mediante mapas interactivos (Fig. 12). Se facilita el acceso mediante enlaces a diferentes archivos y webs para poder examinar la morfología en diferentes formatos. Las fichas contendrán información general, resultados analíticos e información gráfica en 2D y 3D que se podrá visualizar mediante interfases en los documentos PDF y formatos para representación en 3D. Cada ficha con información del impacto alojada en la Web del proyecto dispone de enlaces a textos, vídeos,

mapas del MDT (LAZ), mapa geológico y mapas en diferentes plataformas, ICV, Maps y Earth (Fig. 13).

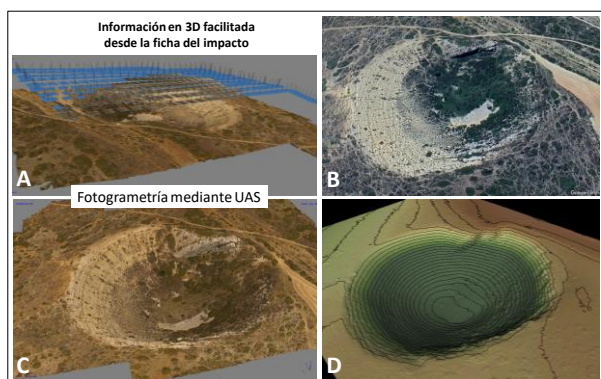


Figura 12: Información aportada en las fichas: a) Captura de la geometría mediante vuelo fotogramétrico; b) Fotografías aéreas obtenidas desde diferentes ángulos; c) Modelo en 3D procesado a partir de vuelos con dron y presentado en formato .obj; d) modelo digital en formato LAZ.

También permite examinar rocas, elementos singulares y estructuras en 3D. La información de la ficha se compone de mapas en diferentes plataformas, ubicación y dimensiones, información geológica, gráficos y diagramas, modelos en 3D, vídeos y vídeos 360°.



Figura 13: Web con mapas interactivos vinculados a las fichas con la información desplegable de cada impacto.

Agradecimientos

La caracterización analítica se ha desarrollado en diferentes laboratorios y centros de la Universidad Politécnica de Valencia con la colaboración de diferentes profesionales a los que se desea agradecer su colaboración: Espectroscopía RAMAN: Dr. José Carlos Manjón y Enrico Bandiello, Departamento de Física Aplicada UPV. Difractómetro de rayos X: Dra. María Dolores Marco Martínez, Departamento de Química. Microscopía Electrónica, José Luis Jordá, Instituto de Tecnología Química, Dr. José Carlos Rodríguez del Departamento de Termodinámica Aplicada y Joaquín Fayos del Servicio de Microscopía.

Los autores agradecen el apoyo y colaboración del Dr. Rafael Royo Pastor y del Dr. Santiago Tormo Esteve.

References

- ALI-DIB, M. and KRISTEN, M., 2020. Automated crater shape retrieval using weakly-supervised deep learning. *Icarus*, **345**(10), 113749.
- BERGANZO-BESGA, I. and ORENGO, A., 2021. Hybrid MSRM-Based Deep Learning and Multitemporal Sentinel 2-Based Machine Learning Algorithm Detects Near 10k Archaeological Tumuli in North-Western Iberia. *Remote Sens.*, **13**, 4181.
- BLAND, P.A. and ARTEMIEVA, N.A., 2006. The rate of small impacts on Earth. *Meteoritics & Planetary Science*, **41**(4), pp. 607–631.
- CAMPANALE, F., MUGNAIOLI, E., GEMMI, M.,L. and FOLCO, L., 2011. The formation of impact coesite. *Scientific Reports*, **11**(16011).

- DI STEFANO, F., CABRELLES, M., GARCÍA-ASENJO, L., LERMA, J.L., MALINVERNI, E. S., BASELGA, S., AND PIERDICCA, R., 2020. Evaluation of long-range mobile mapping system (MMS) and close-range photogrammetry for deformation monitoring. A case study of Cortes de Pallás in Valencia (Spain). *Applied Sciences*, **10**(19), 6831. DOI: 10.3390/app10196831
- DÍAZ-MARTÍNEZ, E., 2004. Registro geológico de eventos de impacto meteorítico en España: revisión del conocimiento actual y perspectivas de futuro. *Journal of Iberian Geology*, **31**, pp. 65-84.
- ERNSTRON K., SCHUESSLER U. and HRADIL K., 2002. The mid-Tertiary Azuara and Rubielos de la Cérda paired impact structures (Spain). *Treballs del Museu de Geologia de Barcelona*, **11**, pp. 5-65
- ESPINOZA-FRAIRE, A.T., SÁENZ-ESQUENA, J.A. and DEL RÍO-SANTANA, O., 2022. Aplicaciones de drones en ingeniería civil. Marcombo Boixareu Editores. ISBN: 978-84-267-3435-8, EAN: 9788426734358
- FAZIO, A., FOLCON, L., D'ORAZIO, M., FREZZOTI, M.L. and CORDIER, C., 2014. Shock metamorphism and impact melting in small impact craters on Earth: Evidence from Kamil crater, Egypt. *Meteoritics & Planetary Science*, **49**(12), pp. 2175–2200.
- FERNÁNDEZ-LOZANO, J. and GUTIÉRREZ-ALONSO, G., 2016. Aplicaciones Geológicas de los Drones - Geological Applications of UAVs. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, **29**.
- FERRIÈRE L., KOEBERL, C., REIMOLD, W.U., LIBOWITZKY, E. and GRESHAKE, A., 2008. Ballen quartz and cristobalite in impact breccias: types, occurrence, and possible origin. Department of Lithospheric Research, University of Vienna.
- FRENCH B.F., 1998. Traces of Catastrophe. A Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures". Lunar and planetary institute, Houston TX 77058-1113, USA.
- FRENCH, B.M. and KOEBERL, C., 2010. The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: What works, what doesn't, and why. *Earth-Science Reviews*, **98**, pp. 123–170.
- HERGARTEN, S. and KENKMANN, T., 2015. The number of impact craters on Earth: Any room for further discoveries?. *Earth and Planetary Science Letters*, **425**, pp. 187–192.
- KENKMANN, T., 2021. The terrestrial impact crater record: A statistical analysis of morphologies, structures, ages, lithologies, and more. *Meteoritics & Planetary Science*, **56**(5), pp. 1024–1070 DOI: 10.1111/maps.13657.
- OSINSKI G.R. and PIERAZZO, E., 2013. *Impact cratering: processes and products*. Blackwell Publishing Ltd.
- OSINSKI, G.R., GRIEVE, R.A. and FERRIERE, L., 2022. Impact Earth: A review of the terrestrial impact record. *Earth-Science Reviews*, **232**, 104112.
- ROBBINS, S.J., and HYNEK, B.M. (2012). A new global database of Mars impact craters ≥ 1 km: 1. Database creation, properties, and parameters. *Journal of Geophysical Research: Planets*, **117**(E5).
- SCHMIEDER, M., and KRING, D.A., 2020. Earth's Impact Events Through Geologic Time: A List of Recommended Ages for Terrestrial Impact Structures and Deposits. *Astrobiology*, **20**(1).
- SPRAY, J.G. and BOONSUE, S., 2018. Quartz–coesite–stishovite relations in shocked metaquartzites from the Vredefort impact structure, South Africa. *Meteoritics & Planetary Science*, **53**(1), pp. 93–109.
- SÁNCHEZ-GARRIDO J.A., ORMÖ J. and SÁNCHEZ-GÓMEZ S.T., 2022. A probable impact structure in Betic Cordillera, Almería, SE Spain. *Europlanet Science Congress*, **16**, EPSC2022-217.
- SERNA, M.M., 2019. *Análisis morfológico de alta resolución en una cuenca torrencial. Aplicación de dron y fotogrametría digital en el barranco el Rebaixader (Pirineo Central)* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona).

CALIDAD DEL AGUA EN EMBALSES DE AGUAS CLARAS DE LA CUENCA DEL JÚCAR CON IMÁGENES SENTINEL-2 NIVEL L2A

WATER QUALITY IN CLEAR WATER RESERVOIRS OF THE JUCAR RIVER BASIN WITH SENTINEL-2 LEVEL L2A IMAGERY

Gabriel R. Caballero^a, Jesús Delegido^{a,*}, Xavier Sòria-Perpinyà^a, Lissette Sánchez-Pérez^a, Antonio Ruiz-Verdú^a, Bárbara Alvado^a, María Concepción Durán^b, Damián Ortega^b, Eduardo Vicente-Pedrés^c, José Moreno^a

^a Image Processing Laboratory (IPL), Universitat de València, Paterna, 46980 Valencia, Spain. , gabriel.caballero@uv.es; , jesus.delegido@uv.es; , Javier.Soria-Perpina@uv.es; , lisgasan@alumni.uv.es; , antonio.ruiz@uv.es; , barbara.alvado@uv.es; jose.moreno@uv.es

^b Confederación Hidrográfica del Júcar, Valencia, Spain. MariaConcepcion.Duran@chj.es; , damian.ortega@chj.es

^c Institut Cavanilles de Biodiversitat i Biología Evolutiva, Universitat de València, Spain. , eduardo.vicente@uv.es

How to cite: G.R. Caballero, J. Delegido, X. Sòria-Perpinyà, L. Sánchez-Pérez, A. Ruiz-Verdú, B. Alvado, M.C. Durán, D. Ortega, E. Vicente-Pedrés y J. Moreno. 2025. Calidad del agua en embalses de aguas claras de la cuenca del Júcar con imágenes Sentinel-2 nivel L2a. En libro de actas: *Quinto Congreso en Ingeniería Geomática*. Valencia, 2 – 3 de Julio de 2025. <http://dx.doi.org/10.4995/CIGeo2025.2025.19876>

Resumen:

Sentinel-2 es una misión satelital del programa Copernicus que ofrece imágenes de 10 m de resolución espacial cada cinco días. Numerosos estudios han demostrado que es adecuado para la estimación de calidad de aguas en lagos y embalses. En este trabajo se estudian 7 embalses españoles de aguas claras de la cuenca del Júcar (Alarcón, Benagéber, Contreras, María Cristina, Regajo, Sitjar y Tous) en los que se han medido distintas variables, entre otras, la clorofila-a (Chl-a), los sólidos en suspensión (TSS), la profundidad de Disco de Secchi (SDD) y la ficocianina (PC). Con estos datos, junto a los espectros de reflectividad obtenidos de imágenes Sentinel-2 nivel L2A, es decir, con la corrección atmosférica que realiza la Agencia Espacial Europea, se han estudiado diferentes índices espectrales. Los resultados muestran que la PC se puede estimar con un índice NDI con las bandas B3 (560 ±17 nm) y B2 (490 ±32 nm), y un ajuste lineal; el SDD se puede obtener mediante un ajuste exponencial de un índice que combina las bandas B2, B3 y B4 (665 ±15 nm) y los TSS se pueden estimar con una relación lineal con un índice que combina las bandas B1 (443 ±10 nm), B2 y B3. Sin embargo, para la Chl-a no se ha encontrado un modelo único para todos los embalses, por lo que se han separado en dos grupos en función de su respuesta espectral. Para un grupo de embalses el modelo que da mejores resultados usa una combinación lineal de B2, B3 y B4 y en el otro se usa un índice tribanda, con las mismas bandas. Estos modelos permiten estimar la calidad del agua de estos embalses, mostrando tanto su distribución espacial como series temporales. Todo ello con un procesamiento sencillo y rápido que se puede hacer en la nube con las herramientas gratuitas de Copernicus.

Palabras clave: Embalses Júcar, Clorofila-a, Sólidos en suspensión, Disco de Secchi, Ficocianina, Sentinel-2

Abstract:

Sentinel-2 is a satellite mission of the Copernicus program that provides 10-meter spatial resolution images every five days. Numerous studies have demonstrated its suitability for estimating water quality in lakes and reservoirs. This study focuses on seven clear-water Spanish reservoirs in the Júcar Basin (Alarcón, Benagéber, Contreras, María Cristina, Regajo, Sitjar, and Tous), where several variables were measured, including chlorophyll-a (Chl-a), total suspended solids (TSS), Secchi disk depth (SDD), and phycocyanin (PC). Using these field measurements alongside reflectance spectra obtained from Sentinel-2 Level-2A images (i.e., atmospherically corrected by the European Space Agency), different spectral indices were analyzed. The results show that PC can be estimated using a NDI index between bands B3 (560 ±17 nm) and B2 (490 ±32 nm), with a linear adjustment; SDD can be obtained through an exponential adjustment of an index combining bands B2, B3, and B4 (665 ±15 nm); and TSS can be estimated with a linear relationship using an index that combines B1 (443 ±10 nm), B2, and B3 bands. However, for Chl-a, no single model has been found for all reservoirs, so they have been divided into two groups based on their spectral signatures. For one group, the best performing model uses a linear combination of B2, B3, and B4 bands, and the other uses a tri-band index with the same

* Corresponding Author: Jesús Delegido, jesus.delegido@uv.es

bands. These models allow for estimating the water quality of these reservoirs, showing both their spatial distribution and time series. All with simple and fast processing that can be done in the cloud using Copernicus' free tools.

Key words: Júcar reservoirs, Chlorophyll-a, Suspended solids, Secchi disk, Phycocyanin, Sentinel-2

1. Introducción

El agua es un recurso natural limitado y esencial para la vida, tanto para los ecosistemas como para el ser humano. Desde la década de los 80, con el uso de los primeros satélites de observación de la Tierra, se han venido estudiando distintos métodos para estimar la calidad del agua, tanto oceánica como continental, usando técnicas de teledetección (Matthews 2011). Esta metodología permite un importante ahorro, tanto en medios como en personal, frente al estudio del agua a partir de análisis de muestras en campo, y es en la actualidad una herramienta operativa importante sobre todo desde el inicio del programa Copernicus de la Unión Europea. Este programa incorpora una serie de satélites, denominados Sentinel, que proporcionan imágenes de alta calidad con un gran número de aplicaciones diferentes. Estas imágenes, junto a programas de software libre de tratamiento de imágenes y productos avanzados de teledetección, son proporcionados de forma gratuita y se garantiza este servicio durante las próximas décadas, lo cual hace especialmente interesante el desarrollo de modelos operativos para distintas aplicaciones agronómicas, ecológicas, cartográficas, etc.

Una de estas misiones es Sentinel-2 (S2), que desde 2016 proporciona imágenes de 10 y 20 m de resolución espacial, con un tiempo de revisita de 5 días y que, a pesar de ser diseñado para tierra, ha mostrado ser muy útil para los estudios de calidad de aguas superficiales (Sòria-Perpinyà *et al.* 2019; Zeng *et al.* 2023). La Agencia Espacial Europea (ESA) proporciona las imágenes en distintos niveles de procesado, entre estos el nivel L2A que incluye georreferenciación y corrección atmosférica, esta última encaminada a eliminar el efecto de la atmósfera. Estas imágenes pueden ser descargadas de la página web Copernicus Browser (CDSE 2025) que también es un geoportal que permite la elaboración y descarga de mapas y productos avanzados junto a series temporales con el procesado en la nube.

El objetivo de este trabajo es el desarrollo de una metodología operativa para la estimación de calidad del agua de siete embalses de aguas claras en la cuenca del Júcar a partir de imágenes S2 de nivel L2A.

2. Materiales y métodos

2.1. Zona en estudio

Los embalses seleccionados han sido Alarcón (AC), Benagéber (BG), Contreras (CN), María Cristina (MC), Regajo (RE), Sitjar (SI) y Tous (TO), en España (Fig. 1). Todos ellos se encuentran dentro del área gestionada por la Confederación Hidrográfica del Júcar, y su estado trófico es oligo-mesotrófico. La transparencia del agua de estos embalses es por lo general alta (entre 3 y 12 metros de profundidad del disco de Secchi), aunque puede bajar a menos de 2 metros tras episodios de

lluvia. El color del agua está determinado por la naturaleza calcárea de sus cuencas y por los diferentes tipos de sólidos en suspensión aportados por los tributarios.



Figura 1: Mapa de localización de los embalses en estudio.

2.2. Datos de campo

Los datos de campo se han obtenido en diferentes campañas realizadas *in situ* entre 2017 y 2024 (Tabla 1) y coincidentes con imágenes S2 sin nubes sobre cada embalse muestreado. En cada campaña de campo, se tomaron muestras de agua desde una barca en varios puntos diferentes, alejados de la costa y georreferenciados. En cada punto se midió la profundidad del disco de Secchi (SD), se midió la ficocianina (PC) con un fluorímetro de campo C3 Submersible Fluorometer (Turner Designs 2025), y se tomaron muestras de agua hasta la profundidad del SD. Las muestras se llevaron a laboratorio donde se midió, entre otras variables, las concentraciones de clorofila-a (Chl-a) y de sólidos totales en suspensión (TSS), siguiendo la metodología descrita en Sòria-Perpinyà *et al.* (2021). En total se dispone de 74 puntos, pero no todos con todas las variables, debido a que no siempre se disponía de la instrumentación necesaria. El número de muestras de cada variable por embalse se muestran en la Tabla 2.

Tabla 1: Número de muestras por año.

Año	Número
2017	13
2018	16
2020	20
2021	17
2024	8

2.3. Selección de índices espectrales

Las imágenes S2 coincidentes con las campañas de campo se descargaron de la página Copernicus Browser de la ESA en nivel L2A.

Tabla 2: Muestras de cada variable por embalse.

Embalse	SD	Chl-a	PC	TSS
Alarcón	10	6	10	3
Benagéber	17	15	13	13
Contreras	12	10	8	10
María Cristina	5	4	0	4
Regajo	3	0	0	3
Sitjar	9	9	5	9
Tous	18	14	13	12
Total	74	58	49	54

Los datos de reflectividad para cada punto de muestreo se obtuvieron calculando la media de una ventana de 3x3 píxeles con el centro en las coordenadas del muestreo *in situ*, obtenidos de la imagen S2. Estos espectros se relacionaron con los datos de campo usando cinco funciones de ajuste: lineal, potencial, exponencial, logarítmica y polinómica y buscando correlaciones tanto con cada banda como con el cociente entre dos bandas, y además los siguientes índices espectrales (Ecs. 1-3) (Dall’Olmo *et al.* 2003; Binding *et al.* 2013):

$$NDI = \frac{R_i - R_j}{R_i + R_j} \quad (1)$$

$$TBDO = R_i \left(\frac{1}{R_j} - \frac{1}{R_k} \right) \quad (2)$$

$$MCI = R_i - \alpha(R_j + (R_k - R_j) \beta) \quad (3)$$

donde

NDI = Índice de diferencia normalizada

$R_{i,j}$ = reflectividad en las bandas i, j

$TBDO$ = Índice tribanda de Dall’Olmo

MCI = MERIS Maximum Chlorophyll Index

α, β = parámetros de ajuste

Finalmente, para la evaluación del mejor algoritmo se consideraron los siguientes estadísticos: R^2 (coeficiente de determinación), RMSE (error cuadrático medio), NRME (error cuadrático medio normalizado), MAE (error medio absoluto) y sesgo (Bias).

3. Resultados y discusión

Con el objetivo de analizar la distribución de los valores de campo, en la Figura 2 se muestran los diagramas de cajas de cada variable en cada embalse, donde el recuadro delimita el rango intercuartílico (IQR; percentil 25-75), la línea horizontal dentro del recuadro indica la mediana, los bigotes (barras de error) indican los percentiles 90 por encima y 10 por debajo y los puntos indican los valores atípicos.

En la Figura 2 se observa que los valores de Chl-a permanecen siempre por debajo de los 2,6 $\mu\text{g/L}$ en Sitjar, Tous, Contreras y Alarcón, por lo que pueden considerarse oligotróficos, de acuerdo con el índice de estado trófico TSI (Carlson 1977).

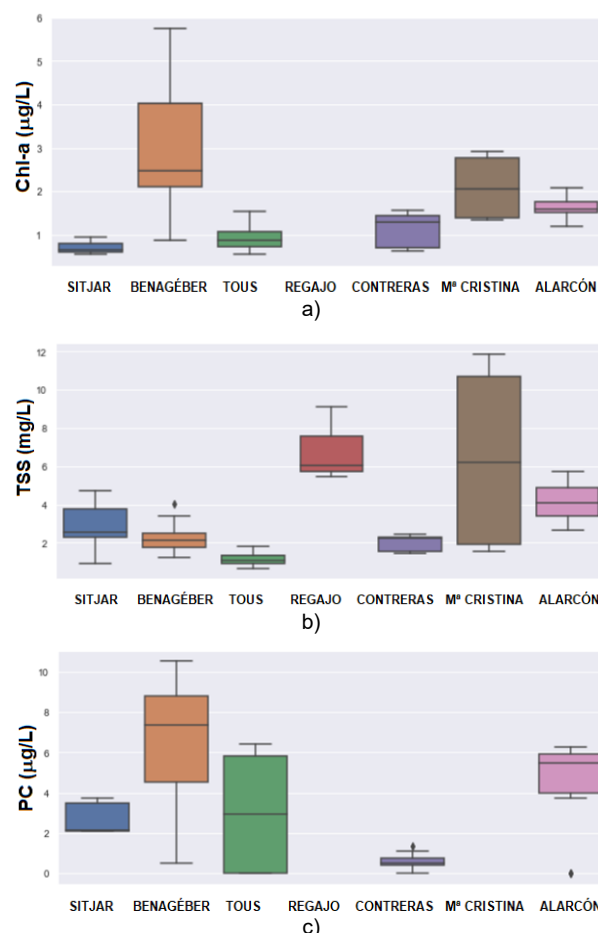


Figura 2: Diagrama de cajas por variable y embalse: a) Boxplot de clorofila-a (en $\mu\text{g/L}$); b) Boxplot de sólidos en suspensión (en mg/L); c) Boxplot de ficocianina (en $\mu\text{g/L}$).

Los embalses de Benagéber (Benaixeve) y María Cristina, presentan valores de Chl-a algo mayores, clasificándose como oligo-mesotróficos. En el embalse de Regajo no se midió la concentración de pigmentos fotosintéticos.

Los sólidos en suspensión en general están por debajo de 8 mg/L , salvo en Regajo y María Cristina. La ficocianina se encuentra en general por debajo de los 8 $\mu\text{g/L}$. Aunque no se han representado, los valores de SD varían entre 1 y 12 m, todo lo cual indica que los embalses seleccionados se pueden clasificar como de aguas claras.

Los mejores resultados, es decir aquellos con mayor R^2 y menores errores, para cada una de las variables en estudio, son los siguientes (Ecs. 4-7):

- Para la profundidad del disco de Secchi:

$$SD = 8,62 e^{(-44,25 MCI)} \quad (4)$$

donde

SD = profundidad del disco de Secchi en m

$MCI = R_{560} - 1,039(R_{665} + 0,612 (R_{490} - R_{665}))$
que se puede simplificar como:

$MCI = R_{560} - 0,4031 R_{665} - 0,6359 R_{490}$, donde los subíndices indican la longitud de onda (en nm) central de la banda.

- Para los sólidos en suspensión:

$$TSS = 158,79 MCI + 1,56 \quad (5)$$

donde

TSS = Sólidos en suspensión en mg/L

$$MCI = R_{560} - 1,015(R_{490} + 0,1502(R_{443} - R_{490}))$$

que se puede simplificar como:

$$TSS = 158,79 R_{560} - 136,964 R_{490} - 24,208 R_{443} \quad (6)$$

- Para ficocianina:

$$PC = 34,08 NDI + 3,45 \quad (7)$$

donde

PC = Ficocianina en $\mu\text{g/L}$

$$NDI = \frac{R_{560} - R_{490}}{R_{560} + R_{490}}$$

Sin embargo, para el caso de la clorofila no se encontraron correlaciones significativas al usar todos los datos de campo de todos los embalses. Por ello se probaron diferentes agrupaciones obteniéndose los mejores resultados con dos grupos: por una parte, Alarcón, María Cristina y Sitjar (N=19), y por otra parte Benagéber, Contreras y Tous (N=39). Los resultados son los siguientes (Ecs. 8 y 9):

- Chl-a para Alarcón, María Cristina y Sitjar:

$$Chl-a = -2,93 TBDO + 0,75 \quad (8)$$

donde

$Chl-a$ = Concentraciones de clorofila-a en $\mu\text{g/L}$

$$TBDO = R_{665} \left(\frac{1}{R_{560}} - \frac{1}{R_{443}} \right)$$

- Chl-a para Benagéber, Contreras y Tous

$$Chl-a = 1,94 e^{(6,8886 MCI)} \quad (9)$$

donde

$$MCI = R_{665} - 2,097(R_{560} + 6,33(R_{490} - R_{560}))$$

que se puede simplificar como:

$$MCI = R_{665} + 11,177 R_{560} - 13,274 R_{490}$$

La Figura 3 muestra el promedio y la desviación estándar de los espectros de reflectividad para cada grupo de embalses. Se observa que en Alarcón, María y Cristina y Sitjar (azul), la reflectividad en las bandas del espectro visible es más elevada y el máximo del verde (R_{560}) es más marcado. En Benagéber, Contreras y Tous (naranja), la diferencia entre R_{490} y R_{560} es mucho menor y la reflectividad en las bandas visibles es más baja también. Las causas de estas diferencias podrían estar en la diferente concentración y naturaleza de las partículas inorgánicas en suspensión, así como la diferente frecuencia de valores de Chl-a $> 3 \mu\text{g/L}$ en las dos submuestras.

En las Figuras 4-8 se muestran los diagramas de puntos con los que se obtuvieron los anteriores ajustes, mostrando también el valor de R^2 .

Como se observa en todos los ajustes, las bandas que intervienen corresponden al espectro visible. Estos resultados coinciden con otras investigaciones. Por

ejemplo, para el caso de la Chl-a diferentes autores muestran que en el caso de aguas claras, las bandas del espectro visible son las determinantes (Llodrà-Llabrés *et al.* 2023; Li *et al.* 2022). Algo similar ocurre en el caso de PC, SD y TSS (Neil *et al.* 2011; Lee *et al.* 2015; Matthews 2011).

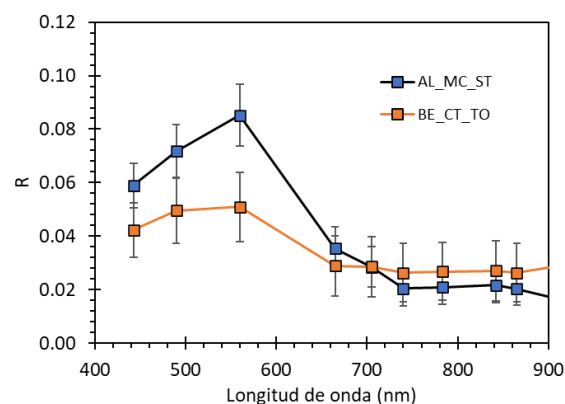


Figura 3: Espectros promedio de reflectividad espectral de los dos grupos de embalses definidos para los modelos de Chl-a: Alarcón, María Cristina y Sitjar (AC_MC_SI; N=19) y Benagéber, Contreras y Tous (BE_CT_TO; N=38).

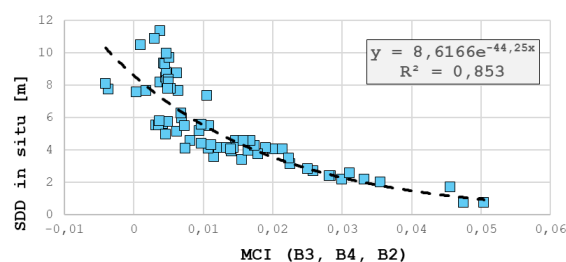


Figura 4: Datos de campo de SD en función del índice MCI calculado con la Ec. (4).

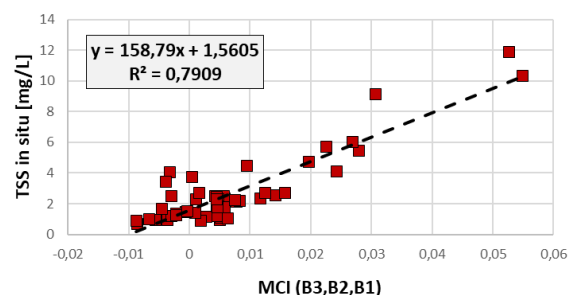


Figura 5: Datos de campo de TSS (mg/L) en función del índice MCI calculado con la Ec. (5).

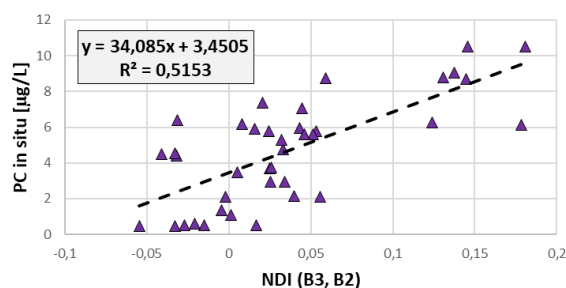


Figura 6: Datos de campo de PC ($\mu\text{g/L}$) en función del índice NDI calculado con la Ec. (7).

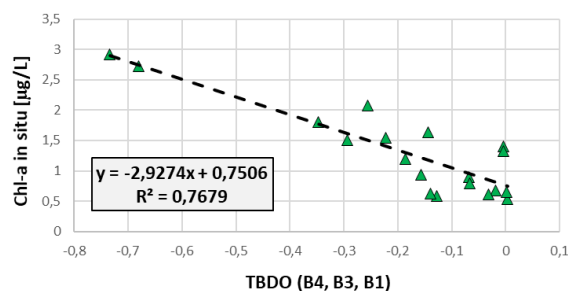


Figura 7: Datos de campo de Chl-a ($\mu\text{g/L}$) en función del índice TBDO, calculado con la Ec. (8), para Alarcón, María Cristina y Sitjar.

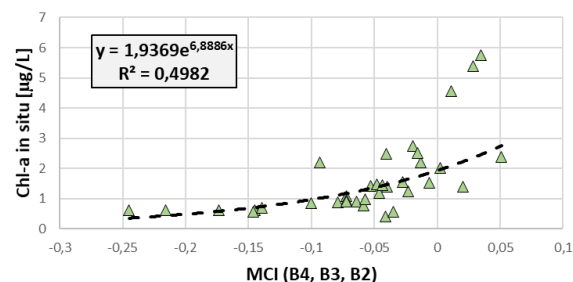


Figura 8: Datos de campo de Chl-a ($\mu\text{g/L}$) en función del índice MCI calculado con la Ec. (9), para Benagéber, Contreras y Tous.

Las Ecs. (4-9) nos permiten hacer tanto mapas de las distintas variables para analizar su distribución espacial, como realizar el análisis multitemporal para estudiar posibles comportamientos estacionales o relacionados con variables de tipo meteorológico o actividades antrópicas.

A modo de ejemplo, en las Figuras 9 y 10 se muestran mapas de clorofila en distintas fechas y embalses. Aquí se aprecia como en el embalse de María Cristina (Fig. 9 izquierda) el valor de Chl-a es mayor en la zona de entrada del río (norte) mientras cerca de la presa, situada en la parte sur, disminuye mostrando un agua más oligotrófica. Lo mismo ocurre en Alarcón (Fig. 9, derecha) y en Benagéber y Tous (Fig. 10) pues en todos ellos la presa se sitúa en la parte sur del embalse.

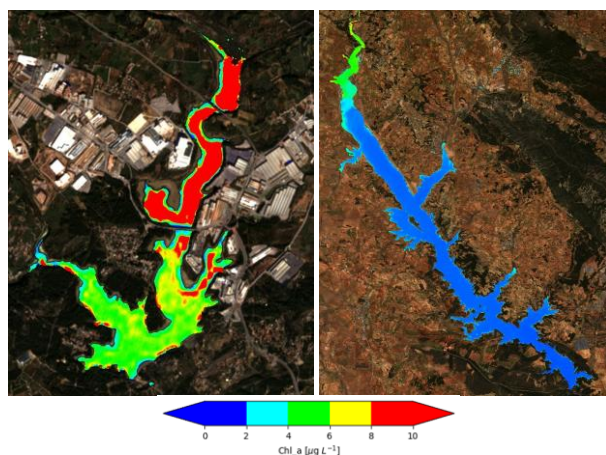


Figura 9: Mapas de Clorofila-a ($\mu\text{g/L}$) en María Cristina (izquierda) el 9/01/2025 y Alarcón (derecha) el 02/06/2025, obtenidos con la Ec. (8).

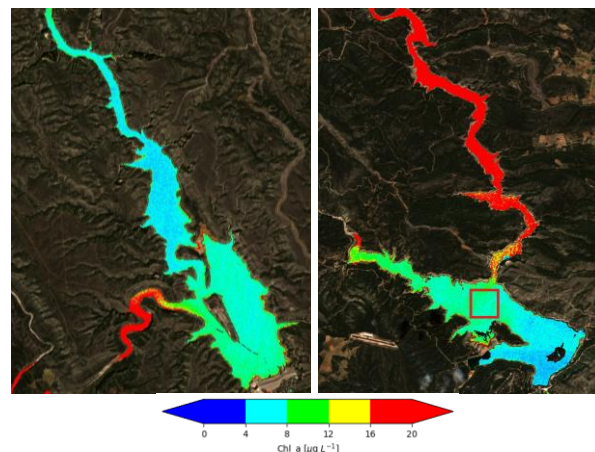


Figura 10: Mapas de Clorofila-a ($\mu\text{g/L}$) en Tous (izquierda) y Benagéber (derecha) el 27/03/2025, obtenidos con la Ec. (9). En el mapa de Benagéber se muestra en rojo el área sobre la que se ha hecho el estudio multitemporal.

La Figura 11 muestra una serie temporal, en este caso correspondiente al valor promedio y desviación estándar de la Chl-a en la región señalada en Benagéber (Fig. 10). La figura muestra que este embalse mantiene valores de Chl-a normalmente entre 1 y 4 $\mu\text{g/L}$, con un pequeño aumento en la primavera del 2022.

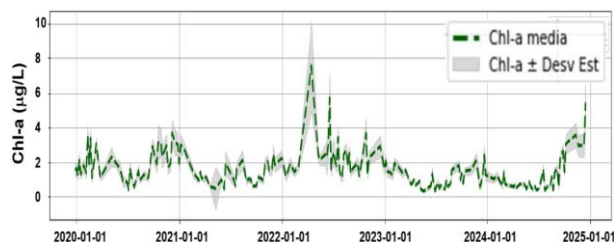


Figura 11: Serie temporal del promedio de Clorofila-a ($\mu\text{g/L}$) en Benagéber en la región de interés seleccionada (Fig. 10).

4. Conclusiones

En este trabajo se ha desarrollado una metodología para la estimación de cuatro variables clave para la estimación de calidad de aguas usando Sentinel-2, en embalses de aguas claras de la cuenca del Júcar. Las variables son SD, TSS, PC y Chl-a. Para ello se han calibrado distintos índices espectrales que obtienen buena correlación con los datos de campo. Los índices se han obtenido con las bandas situadas en el azul (443 nm y 490 nm), verde (560 nm) y rojo (665 nm). Las bandas del "límite del rojo" (red-edge) y del infrarrojo cercano (NIR) no intervienen en los modelos obtenidos, a diferencia de lo que ocurre en aguas turbias, en las que estas bandas tienen mayor relevancia.

El hecho de usar en estos ajustes las imágenes en nivel L2A, permite agilizar el cálculo y poder realizar, tanto los mapas con la distribución espacial de cada variable, como las series temporales, de una manera más eficiente, pues el proceso puede ser realizado en la nube, por ejemplo, en el geoportal de Copernicus Browser.

Agradecimientos

Este trabajo se ha llevado al cabo en el marco de dos proyectos de investigación. Por una parte, el convenio entre la Confederación Hidrográfica del Júcar y la Universidad de Valencia para el seguimiento de la calidad de aguas en embalses, lagos y otras masas de

agua de la cuenca del Júcar, a partir de datos de sensores remotos de observación de la Tierra (Convenio TELEDAMB23).

Por otra parte, el proyecto RESSBIO (Remote Sensing Spectroscopy for wetlands Biodiversity, CIPROM2021-049) subvencionado por la Generalitat Valenciana dentro del programa Prometeo.

References

- BINDING, C.E., GREENBERG, T.A., and BUKATA, R.P., 2013. The MERIS Maximum Chlorophyll Index; its merits and limitations for inland water algal bloom monitoring. *Journal of Great Lakes Research*, **39**, Supplement 1, pp. 100-107. DOI: 10.1016/j.jglr.2013.04.005
- CARLSON, R.E., 1977. A Trophic State Index for lakes. *Limnology And Oceanography*, **22**(2), pp. 361–369.
- CDSE, 2025. Copernicus Data Space Ecosystem Browser v1.23.0. Available: <https://browser.dataspace.copernicus.eu/> [6/30, 2025].
- DALL'OLMO, G., GITELSON, A., and RUNDQUIST, D., 2003. Towards a unified approach for remote estimation of chlorophyll-a in both terrestrial vegetation and turbid productive waters. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1938. DOI: 10.1029/2003GL018065
- LEE, Z.P., SHANG, S.L., HU, C.M., DU, K.P., WEIDEMANN, A., HOU, W.L., LIN, J.F., and LIN, G., 2015. Secchi disk depth: A new theory and mechanistic model for underwater visibility. *Remote Sens. Environ.*, **169**, pp. 139–149.
- LI, Y., ZHOU, Z., KONG, J., WEN, C., LI, S., ZHANG, Y., XIE, J., and WANG, C., 2022. Monitoring Chlorophyll-a concentration in karst plateau lakes using sentinel 2 imagery from a case study of pingzhai reservoir in guizhou, china. *European Journal of Remote Sensing*, **55**, pp. 1–19.
- LLODRÀ-LLABRÉS, J., MARTÍNEZ-LÓPEZ, J., POSTMA, T., PÉREZ-MARTÍNEZ, C., and ALCARAZ-SEGURA, D., 2023. Retrieving water chlorophyll-a concentration in inland waters from Sentinel-2 imagery: Review of operability, performance and ways forward. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **125**, 103605. DOI: 10.1016/j.jag.2023.103605
- MATTHEWS, M.W., 2011. A current review of empirical procedures of remote sensing in inland and near-coastal transitional waters. *Int. J. Remote Sens.*, **32**, pp. 6855–6899.
- NEIL, C., CUNNINGHAM, A., and MCKEE, D., 2011. Relationships between suspended mineral concentrations and red-waveband reflectances in moderately turbid shelf seas. *Remote Sens. Environ.*, **115**, pp. 3719–3730. DOI: 10.1016/j.rse.2011.09.010
- SÒRIA-PERPINYÀ, X., URREGO, P., PEREIRA-SANDOVAL, M., RUIZ-VERDÚ, A., PEÑA, R., SORIA, J.M., DELEGIDO, J., VICENTE, E., and MORENO, J., 2019. Monitoring the ecological state of a hypertrophic lake (Albufera of València, Spain) using multitemporal Sentinel-2 images. *Limnetica*, **38**(1), pp. 457–469.
- SÒRIA-PERPINYÀ, X., VICENTE, E., URREGO, P., PEREIRA-SANDOVAL, M., TENJO, C., RUIZ-VERDÚ, A., DELEGIDO, J., SORIA, J.M., PEÑA, R., and MORENO, J., 2021. Validation of Water Quality Monitoring Algorithms for Sentinel-2 and Sentinel-3 in Mediterranean Inland Waters with In Situ Reflectance Data. *Water*, **13**, 686. DOI: 10.3390/w13050686
- TURNER DESIGNS, 2025. Fluorometers for Water Quality | Turner Designs | United States. Available: <https://www.turnerdesigns.com/> [6/30, 2025].
- ZENG, F., SONG, C., CAO, Z., XUE, K., LU, S., CHEN, T., and LIU, K., 2023. Monitoring inland water via Sentinel satellite constellation: A review and perspective. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **204**, pp. 340-361. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2023.09.011

COMMUNITY-BASED GEOSPATIAL MULTI-HAZARD ANALYSIS OF THE BUILT HERITAGE IN GUARANDA, ECUADOR

ANÁLISIS GEOESPACIAL DE MULTIAMENAZAS EN EL PATRIMONIO EDIFICADO EN GUARANDA, ECUADOR, BASADO EN LA COMUNIDAD

Alejandra Benavides-Ocampo^{a,*}, Jorge M. Gaspar-Escribano^a, Carlos Ocampo-León^b, Leo Zurita-Arthos^c

^a Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, C/ Mercator 2, 28031 Madrid, Spain. , alejandra.benavides@alumnos.upm.es; , jorge.gaspar@upm.es

^b Facultad de Ciencias de la Salud y del Ser Humano, Universidad Estatal de Bolívar, Av. Ernesto Che Guevara s/n y Av. Gabriel Secaira, 020102 Guaranda, Ecuador. , cocampo@ueb.edu.ec

^c Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales, Universidad San Francisco de Quito, Av. Diego de Robles y Vía Interoceánica, Cumbayá, Quito, Ecuador. , lzurita@usfq.edu.ec

How to cite: A. Benavides-Ocampo, J.M. Gaspar-Escribano, C. Ocampo-León y L. Zurita-Arthos. 2025. Community-based geospatial multi-hazard analysis of the built heritage in Guaranda, Ecuador. En libro de actas: *Quinto Congreso en Ingeniería Geomática*. Valencia, 2 – 3 de Julio de 2025. <http://dx.doi.org/10.4995/CIGeo2025.2025.19895>

Abstract:

Disaster risk reduction in heritage and culturally significant assets within the urban and rural parishes of Guaranda is a strategic priority for preserving cultural identity and strengthening community resilience. This study assesses the vulnerability of heritage buildings through a multidisciplinary approach that integrates local knowledge and promotes the active participation of key stakeholders. The applied methodology was structured into four phases: (i) preliminary analysis, (ii) inventory update, (iii) vulnerability assessment, and (iv) evaluation of the process and its social and impact in the community. Main results include the inventory update of 526 heritage buildings, achieving 99% coverage with updated data. Additionally, various traditional construction typologies were identified, and thematic maps were developed to represent vulnerability to seismic, flood, landslide, and volcanic hazards. Lastly, citizen participation was strengthened through the implementation of a satisfaction survey and the creation of the collective “Somos Memoria”.

Key words: Geomatics, Built Heritage, Natural Disasters, GIS, Community Resilience

Resumen:

La reducción del riesgo de desastres en los bienes patrimoniales y de interés patrimonial de las parroquias urbanas y rurales del cantón Guaranda constituye un eje estratégico para la preservación de la identidad cultural y el fortalecimiento de la resiliencia comunitaria. El presente estudio evalúa la vulnerabilidad de las edificaciones patrimoniales a través de un enfoque multidisciplinario que integra el conocimiento local y promueve la participación activa de actores clave. La metodología aplicada se estructuró en cuatro fases: (i) análisis preliminar, (ii) actualización del inventario, (iii) cálculo de la vulnerabilidad y (iv) evaluación del proceso e impacto social y comunitario. Entre los principales resultados, se logró la actualización de 526 edificaciones patrimoniales, alcanzando un 99 % de cobertura con datos actualizados. Asimismo, se identificaron diversas tipologías constructivas tradicionales y se elaboraron mapas temáticos que reflejan la vulnerabilidad frente a amenazas sísmicas, de inundación, deslizamiento y actividad volcánica. Finalmente, se fortaleció la participación ciudadana mediante la aplicación de una encuesta de satisfacción y la conformación del colectivo “Somos Memoria”.

Palabras clave: Geomática, Patrimonio Edificado, Desastres naturales, SIG, Resiliencia Comunitaria

1. Introduction

At a global level, the conservation preservation of built heritage is compromised by its intrinsic vulnerability and the impact of climate change effects and of natural hazards (Chmutina *et al.* 2021). In response, UNESCO has promoted heritage protection through the 1972

Convention, recognizing its cultural value and providing assistance in risk contexts (Francioni and Lenzerini 2023; Gruber 2017). ICOMOS, as an advisory body, has established guidelines through the Venice Charter (Gazzola *et al.* 1964) and programs like Historic Cities, which aim to harmonize conservation and sustainable

* Corresponding Author: Alejandra Benavides-Ocampo, alejandra.benavides@alumnos.upm.es

urban development (Labadi *et al.* 2021; Aguirre *et al.* 2021; Kern *et al.* 2021).

In this framework, global instruments such as the UN 2030 Agenda and the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030 emphasize the importance of incorporating communities into risk management (De Vries 2020; United Nations, 2015).

Recent research highlights that participatory approaches not only improve the quality of information but also strengthen community resilience (Builes-Jaramillo *et al.* 2025; Greiving *et al.* 2021; Sevilla *et al.* 2023).

In Ecuador, the protection of cultural heritage is guaranteed in the 2008 Constitution and is operationalized through the Organic Code of Territorial Organization, Autonomy, and Decentralization, which assigns competencies to the Decentralized Autonomous Governments (Asamblea Constituyente 2008; Asamblea Nacional 2010; Sánchez-Cortez 2019). Furthermore, the recent reform to the Organic Law for Integrated Disaster Risk Management (2024) strengthens, for the first time, citizen participation in planning and responding to adverse events.

The experience of the 2016 earthquake in Manabí highlighted the crucial role of local knowledge in recovery processes (Cevallos-Merki and Joerin 2021; Sadiqi *et al.* 2017). However, Ecuador's cultural heritage continues to be vulnerable due to the recurrence of disasters and the structural fragility of its building stock, particularly in heritage cities (INPC 2024; Daly *et al.* 2023).

Guaranda, the capital of Bolívar Province, is one such case. With 114 heritage buildings in its historic center and 308 in urban and rural parishes (GAD Guaranda, 2020), these structures play key roles in the local economic and social life. Between 2014 and 2024, the canton faced landslides (30.8%), earthquakes (4.2%), volcanic activity (3.3%), and flooding (2.6%), highlighting the urgency of implementing risk management strategies based on technical knowledge and community participation (SNGRE 2025).

Previous studies warn of the accelerated loss of built heritage due to weaknesses in local management and constant exposure to natural hazards (Paredes *et al.* 2020; Cacuango and Noboa 2023). Moreover, the peripheral location of Guaranda limits its integration into national dynamics, complicating strategic heritage planning (Zurita 2024; Cui *et al.* 2021; Cui *et al.* 2021). In contrast, cities like Quito, Cuenca, and Guayaquil have implemented adaptive strategies with community participation, reinforcing the need to engage social actors in sustainable conservation (Carrera 2024).

Understanding the structural vulnerability of heritage buildings thus becomes an essential requirement for defining sustainable intervention strategies, which involves adopting new technologies and integrated approaches (Jigyasu and Chmutina 2023). In this context, we initiated a collaborative process of collecting information on heritage buildings (Benavides-Ocampo *et al.* 2023).

This study aims to analyze the structural vulnerability of built heritage to natural hazards by integrating geospatial tools and the active participation of local stakeholders. Specifically, it seeks to carry out a preliminary analysis

of the risk context, update the heritage inventory by incorporating hazard-related criteria, characterize the current condition of the buildings, and estimate their vulnerability to seismic events, floods, landslides, and volcanic activity. In addition, the study includes an evaluation of the social impact of the process, taking into account community perceptions.

2. Methodology

The research is divided into four phases (Sections 2.1–2.4).

2.1. Phase I: Preliminary analysis

The canton of Guaranda preliminary phase of the study consisted of a comprehensive diagnosis of the heritage and risk context of the Guaranda canton, based on a method structured around six key components:

1. Background review: A documentary review was conducted of the municipal heritage inventories from 1997 and 2008, which recorded 624 culturally valuable assets. However, these documents presented significant limitations: they lacked updated information on structural conditions, community risk perception, and georeferenced location, which restricted their usefulness for effective risk management. In parallel, specialized literature was reviewed, such as the study by Silva and Dávila (2002), which documents fundamental aspects of the built heritage, including its history, architectural typology, and construction characteristics.

To contextualize the urgency of the analysis, official data from the period 2014–2024 were incorporated, reporting 666 anthropic and natural events mainly landslides, earthquakes, floods, and volcanic activity with significant impacts on housing, road infrastructure, and basic services. Nevertheless, the absence of a specific and systematic record of the impacts on heritage buildings persists, representing a critical gap for their management and conservation.

2. Definition of objectives: Objectives were established to assess the vulnerability of the built heritage from a territorial, geospatial, and participatory approach, supported by cartographic evidence.
3. Identification of needs and resources: The review of information made it possible to identify key needs: the lack of an updated diagnosis of the condition of heritage assets, the absence of systematic records on exposure and vulnerability, limited community participation in risk management, and low integration of geospatial technologies. At the same time, the resources necessary for the development of the study were evaluated in four categories: technological (equipment and software), infrastructural (workspace), human (interdisciplinary teams and community), and documentary (access to archives and historical inventories).
4. Legal and regulatory framework: An analysis was carried out of the national legal framework applicable to the protection of cultural heritage and risk management, including the Constitution of

Ecuador, the Organic Code of Territorial Organization, Autonomy and Decentralization (COOTAD), and the Organic Law of Culture, in order to ensure the normative coherence of the adopted approach.

5. Engagement of key stakeholders: Coordination and collaborative work between local authorities, academic institutions, specialized technicians, students, and the community at large were actively encouraged. This strategy sought to consolidate a strong, multidisciplinary collaborative network to coordinate efforts and share knowledge and resources.
6. Definition of shared goals: Through a participatory approach, shared goals were defined, aimed at updating the heritage inventory of the Guaranda canton by incorporating risk and community perception criteria. Additionally, the formation of an interdisciplinary team responsible for the collection and analysis of information was proposed.

2.2. Phase II: Inventory update

Participatory planning was carried out through workshops and meetings with local stakeholders, allowing for the resolution of questions, identification of needs, and coordination of actions for data collection. A work schedule was developed, and training sessions were conducted for students from the Risk Management program at the Universidad Estatal de Bolívar, who were responsible for collecting field data. These training sessions covered methodological, architectural and geomatic aspects.

Outreach meetings were organised to present the project, explain the survey, and establish a communication channel with the community. These were held at the City Hall and rural parish offices and counted with the participation of property owners and leaders of rural parishes.

The data collection process was organized into five territorial phases over ten months, covering both urban and rural parishes of the Guaranda canton. In total, information was updated for 624 heritage and heritage-interest buildings, based on the INPC (2011) guidelines. New indicators were incorporated, including geographic location, accessibility, mobility, community perception of hazards, and current structural conditions.

In the weeks following the fieldwork, a quality control process was conducted to correct inconsistencies, ensure complete data entry and assess information quality. Finally, the results were systematized and presented through graphs to facilitate data analysis and interpretation. As part of the inventory update, each building was georeferenced and classified according to construction typology, number of floors, year of construction, structural system (e.g., adobe, tapial, wood), roofing type, and current conservation status.

The geographic location of each asset was recorded using GPS and incorporated into a GIS environment. Photographic documentation and attribute data were collected in the field using standardized survey forms. Although LiDAR or close-range photogrammetry was not available during this phase, key structural details and architectural attributes were systematically captured,

enabling spatial analysis and thematic cartography. This dataset formed the technical basis for the vulnerability assessment carried out in the following phase.

2.3. Phase III: Vulnerability calculation

To assess the vulnerability of heritage buildings to natural hazards, a total of 526 registered buildings from the updated inventory were analyzed, as the remaining 98 correspond to vacant land or new constructions. The analysis considered variables such as structural characteristics, geographical location, hazard perception, vulnerability conditions, state of conservation, and photographic images. The methodology proposed by the United Nations Development Programme (UNDP) & the National Secretariat for Risk Management (2012) was used as a reference and adapted with the introduction of new parameters. A total of eight ($i=1\dots8$) vulnerability factors were considered to calculate a vulnerability index associated with each hazard, using a nonlinear scale with 0, 1, 5 and 10 for negligible, low, moderate and high vulnerability, respectively (Table 1).

Structural vulnerability variables were weighted following the methodology proposed by UNDP and the National Secretariat for Risk Management (2012), which combines empirical analysis, expert judgment, artificial intelligence, and multi-criteria techniques.

Although it involves a degree of subjectivity, this approach allows for the prioritization of variables according to their influence on the response of buildings to natural hazards, with weights ranging from 0.64 to 4.84 (Table 2).

This logic is consistent with the GNDT 2000 method, widely applied in Latin America due to its qualitative approach, reliance on visual inspection, and suitability for urban-scale analysis (Sánchez *et al.* 2025).

The vulnerability was estimated as (Eq. 1):

$$VI = \sum_{i,j} V_{i,j} * W_{i,j} \quad (1)$$

where VI is the Vulnerability index, $V_{i,j}$ is the vulnerability parameter value for vulnerability factor i (Table 1) and hazard type j ($j=1, 2, 3$ and 4 correspond to earthquake, flood, landslide and volcanic eruption, respectively) and $W_{i,j}$ are the weights for vulnerability factor i and hazard type j .

The distribution of resulting VI values is reorganised in a qualitative scale of very low, low, medium, high, and very high vulnerability index (Table 3).

The geospatial analysis was a fundamental component of the methodology, carried out entirely using ArcGIS Pro 2.8.0. Initially, a preliminary processing was performed in Excel to classify heritage buildings into five structural vulnerability levels: very low, low, medium, high, and very high.

Table 1: Analysis of physical vulnerability factors (with i-value) and parameters of urban buildings according to the Hazard.

<i>Vulnerability factor</i>	<i>Parameters</i>	<i>Earthquake</i>	<i>Flood</i>	<i>Landslide</i>	<i>Volcanic eruption</i>
Structural System (1)	Wooden structure	1	10	10	10
	Tapial structure	10	10	10	5
	Load-bearing wall structure	5	5	10	5
	Mixed wood/tapial or adobe structure	5	5	5	5
Wall Material Type (2)	Brick wall	1	1	5	1
	Stone wall	10	5	10	5
	Adobe wall	10	5	10	5
	Tapial/bahareque/ wood wall	5	5	10	5
Roof Type (3)	Wooden beams and zinc	5	5	NA	10
	Wooden beams and tiles	5	5	NA	5
Floor System (4)	Wooden beams and framework	5	NA	NA	NA
Number of Floors (5)	1 floor	0	10	10	10
	2 floors	1	5	5	5
	3 floors	5	1	1	1
Year of Construction (6)	Before 1970	10	10	10	10
Condition of Conservation (7)	Good	0	0	0	0
	Acceptable	1	1	1	1
	Regular	5	5	5	5
	Poor	10	10	10	10
Shape of the Construction (8)	Regular	0	0	0	0
	Irregular	5	NA	NA	NA

Table 2: Vulnerability factor weighting by Natural Hazard. Earthquake (E); Flood (F); Landslide (L); Volcanic eruption (V).

<i>Vulnerability factor</i>	<i>W E</i>	<i>W F</i>	<i>W L</i>	<i>W V</i>
Structural System	1.43	1.25	2	0.81
Wall Material	1.43	2.75	2	1.3
Roof Type	1.19	0.75	X	4.84
Floor Type	1.19	X	X	X
Number of Floors	0.95	2.75	2	1.6
Year of Construction	1.19	1.25	2	0.64
Condition of Conservation	1.19	1.25	2	0.81
Shape of the Construction	1.43	X	X	X

Table 3: Qualitative scale of VI.

<i>Setting</i>	<i>Very Low</i>	<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>High</i>	<i>Very High</i>
VI value	<20	20-40	40-60	60-80	>80

This information was integrated into a point vector layer corresponding to the georeferenced location of each property. Subsequently, key inputs such as the cadastral layer and parish territorial profiles were incorporated. Through spatial join techniques and thorough verification, precise correspondence between technical data and its spatial representation was ensured.

The spatial analysis was enhanced with tools like Overlay Analysis and classified symbology, allowing the identification of overlaps between structural

vulnerabilities and natural hazards present in the territory.

The results were visualized through thematic maps and graphical products, which were shared in working sessions with local stakeholders to facilitate understanding of the vulnerability levels of the built heritage.

2.4. Phase IV: Evaluation of the process and community/social impact

This phase incorporated a participatory evaluation to analyze local stakeholders' perceptions regarding the usefulness, inclusiveness, and relevance of the implemented approach.

A survey was conducted targeting property owners, cantonal and parish authorities, technicians, and community groups, collecting opinions on community impact, cultural significance, and proposals for sustainability. This strengthened the collaborative component of the study and provided key inputs for its continuity or replication.

3. Results

The results obtained in the technical-scientific field include, first and foremost, the systematization of 100% of the inventory forms corresponding to the registered heritage real estate assets from 1997, as well as those of heritage interest from 2008.

The current condition of the heritage buildings was successfully characterized, achieving 99% coverage of updated data, which ensured the integrity of the inventory and received a positive response from the community.

During the architectural analysis, a clear predominance of two typologies was identified (Table 4).

Table 4: Predominant typologies.

Vulnerability factor	Typology 1	Typology 2
Structural System	Adobe	Tapial
Wall Material	Adobe	Wood and Tapial
Roof Type	Wooden beams and framework	Wood and zinc
Floor Type	Wooden beams and framework	Wood
Number of Floors	2	2
Year of Construction	1850	1930–1940
Condition of Conservation	Good	Regular
Shape of the Construction	Regular	Regular

Typology 1 (Fig. 1), featuring an adobe structure and a tile roof supported by wooden beams, dates back to 1850 and is in good condition. In contrast, Typology 2 (Fig. 2), built between 1940 and 1950, uses rammed earth and wood, and shows an adaptation through the use of zinc in the roofing. Although both have two floors and a regular shape, Typology 2 is in regular conservation condition.

The vulnerability analysis was applied to 526 heritage buildings. Based on the proposed methodology, thematic maps were generated to represent the structural vulnerability of the typologies against natural hazard such as earthquakes (Fig. 3), landslides (Fig. 4), volcanic (Fig. 5), floods (Fig. 6).

Buildings made of rammed earth, adobe, and those in poor condition show the highest vulnerability values, as their structural rigidity prevents an adequate response to ground vibrations.

San Lorenzo is one of the parishes with the highest concentration of buildings with high or very high seismic vulnerability, due to a combination of fragile materials and old construction.



Figure 1: Typology 1.



Figure 2: Typology 2.

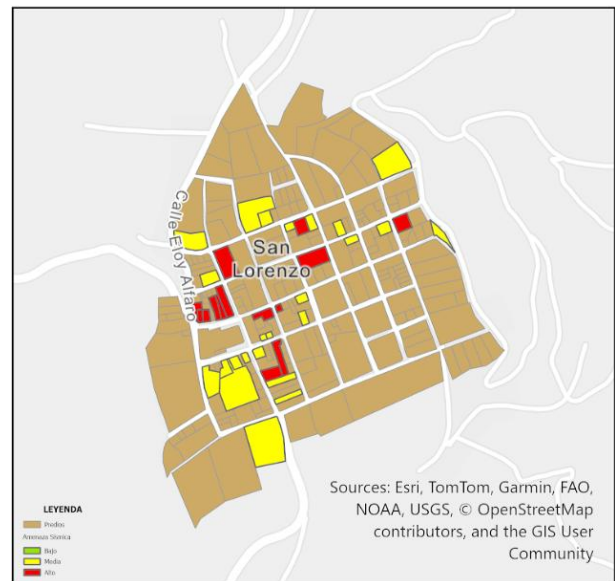


Figure 3: Vulnerability of heritage buildings to Seismic Hazard.

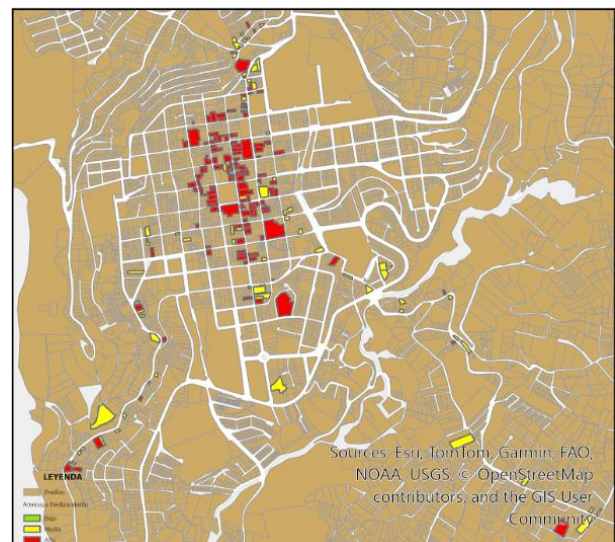


Figure 4: Vulnerability of heritage buildings to Landslide Hazard.

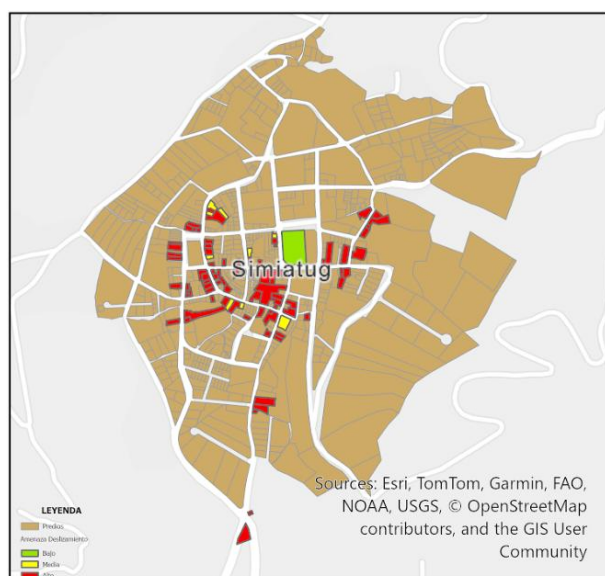


Figure 5: Vulnerability of heritage buildings to Volcanic Hazard.

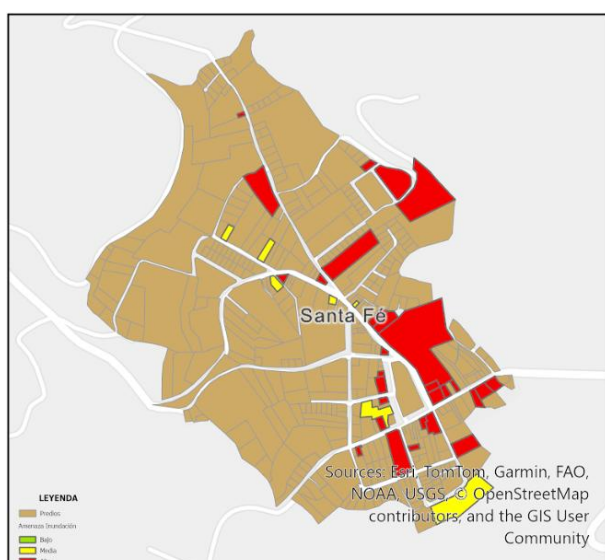


Figure 6: Vulnerability of heritage buildings to Flood Hazard.

This map shows the buildings most susceptible to structural failures caused by differential settlements or ground movements, based on their material and structural configuration.

The analysis identified the historic center and the urban parishes of Ángel Polibio Chávez, Gabriel Ignacio Veintimilla, and Guanujo as critical zones, where rigid and fragile structures such as adobe and stone predominate, which do not tolerate ground deformations.

This map estimates the behavior of construction materials in response to ash fall, heat, and flows associated with volcanic activity. Vulnerability is higher in buildings with lightweight zinc roofs supported by wooden structures, poor conservation conditions, and those built before 1970. The parish of Simiatug contains a significant number of buildings with these characteristics, resulting in a high level of structural vulnerability to this hazard.

This map shows the structural vulnerability of heritage buildings to moisture and prolonged contact with water, particularly during flood events. Buildings constructed with materials sensitive to moisture absorption, such as wood, rammed earth, or bahareque, are the most affected, especially those that are single-story and built before 1970. In this context, the parish of Santa Fe stands out again due to the high number of buildings with these characteristics, resulting in elevated levels of vulnerability to accelerated water-related deterioration.

A total of 125 responses were obtained from the satisfaction survey, corresponding to direct beneficiaries (e.g., property owners) and indirect beneficiaries (authorities, technicians, academics, and researchers) of the project (Fig. 7). The results reflect a predominantly positive evaluation of the project's impact on the community.

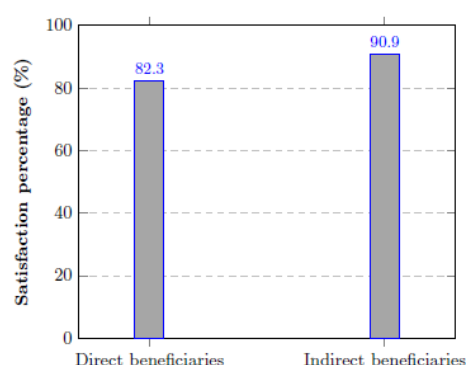


Figure 7: Satisfaction level of direct and indirect beneficiaries.

Additionally, the formation of the citizen collective "*Somos Memoria*", composed of local residents committed to the preservation of architectural heritage, stands out. This initiative has strengthened citizen participation processes in the territory.

The results highlight a strengthening of the bond between the social, academic, and institutional sectors, consolidating a solid foundation for the continuation of coordinated actions in favor of cultural heritage preservation.

4. Discussion

Although the results obtained represent a significant advance in the characterization and analysis of the built heritage of the Guaranda canton, the study presents some limitations that should be considered when interpreting its scope and projections.

The vulnerability assessment focused on the main (more frequent) natural hazard affecting the study area: earthquakes, floods, landslides, and volcanic eruptions.

Other hazard such as (wild-)fires, deterioration due to human activity, or abandonment processes also represent significant risks to heritage assets and need to be assessed in the future.

In this context, it is suggested to incorporate expert criteria to determine the weights of the different risk factors, in order to refine the assessment of heritage vulnerability.

From a social perspective, although the formation of the "*Somos Memoria*" collective represents a valuable

advance in citizen participation, this experience is still in its early stages. Its long-term sustainability will depend on external factors such as ongoing institutional support, the allocation of resources, and coordination with long-term public policies.

These limitations open opportunities for future research that deepens structural analysis, incorporates new hazard, diversifies participation tools, and promotes long-term monitoring mechanisms for integrated and sustainable heritage management.

5. Conclusions

The 99% of heritage assets in the Guaranda canton were duly systematized and updated, ensuring the integrity of the inventory and facilitating decision-making for their conservation.

The creation of the "Somos Memoria" collective consolidated a space for active participation of local

residents in the protection of heritage, reinforcing the community's commitment to its preservation. The characterization of the heritage buildings was successfully completed, providing a detailed understanding of their current condition and the necessary future interventions. The vulnerability analysis, conducted on 526 heritage buildings, incorporated the perception of risks by the property owners, helping to understand the relationship between the community and natural hazard. Through the calculation of vulnerability of the structures to earthquakes, floods, landslides, and volcanic eruptions, key tools were provided to strengthen community resilience and promote a participatory and collaborative risk management approach. The surveys conducted with direct and indirect beneficiaries reflected a high level of satisfaction with the project results, reinforcing its relevance and the positive impact on the community.

References

- AGUIRRE, M., LOBO, P., and GARCÍA, D., 2021. Historic preservation in the context of natural disasters: A comparative study of Latin American cities. *Urban Studies*, **58**(4), pp. 905-927.
- ASAMBLEA CONSTITUYENTE, 2008. Constitución de la República del Ecuador. Registro Oficial No. 449, 20 de octubre de 2008.
- ASAMBLEA NACIONAL, 2010. Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización. Quito: Asamblea Nacional.
- BENAVIDES-OCAMPO, A., GASPARESCRIBANO, J., and OCAMPO-LEÓN, C., 2023. Field Campaign for the Collection of Exposure Data Regarding Natural Hazards in Heritage Buildings, Guaranda, Ecuador. *Environmental Sciences Proceedings*, **28**(1), 14.
- BUILES-JARAMILLO, J., GONZÁLEZ, J., and RODRÍGUEZ, C., 2025. Participatory risk management for community resilience in heritage protection: Case studies from Colombia and Ecuador. *Journal of Risk Management*, **19**(2), pp. 111-127.
- CACUANGO, N., and NOBOA, G., 2023. Natural risks and the vulnerability of heritage buildings in Ecuador: A case study of Guaranda. *Ecuadorian Journal of Architecture and Urban Planning*, **19**(4), pp. 78-94.
- CARRERA-REYES, E.A., 2024. Conservación del patrimonio cultural frente al cambio climático desde la planificación urbana sostenible. Caso Pucará San Luis.
- CEVALLOS-MERKI, S., and JOERIN, J., 2021. The role of local knowledge in the recovery after the 2016 Manabí earthquake. *Journal of Post-Disaster Recovery*, **13**(4), pp. 105-120.
- CHMUTINA, K., DE ARAUJO, P., and O'CONNOR, R., 2021. Vulnerability of historic buildings to natural hazards: A global review. *Natural Hazards*, **105**(3), pp. 1045-1073.
- CUI, Y., RUDOKAS, M., and SPREGA, M., 2021. Risk and resilience in cultural heritage management in Ecuador. *International Journal of Heritage Studies*, **28**(1), pp. 67-82.
- SILVA-MONTENEGRO, F. and DÁVILA-VILLAFUERTE, G., 2002. *Guaranda Patrimonio Cultural del Ecuador*. Quito: Imprefepp.
- DALY, K., FERRIER, G., and CORDERO, L., 2023. Vulnerability of Ecuador's built heritage to seismic hazards: A regional analysis. *Natural Hazards Review*, **24**(1), pp. 45-61.
- DE VRIES, F., 2020. The UN 2030 Agenda and heritage risk management: Aligning international frameworks with local action. *Disaster Risk Reduction Journal*, **12**(1), pp. 23-35.
- FRANCIONI, F., and LENZERINI, F., 2023. Cultural heritage and risk management: The role of UNESCO in disaster risk reduction. *International Journal of Heritage Studies*, **29**(2), pp. 126-145.
- GAD Guaranda, 2020. Inventario de edificaciones patrimoniales del cantón Guaranda. Guaranda: Gobierno Autónomo Descentralizado del cantón Guaranda.
- GAZZOLA, P., LEMAIRE, R., BASSEGODA-NONELL, J., BENAVENTE, L., BOSKOVIC, D., DAIFUKU, H., and ZBISS, M., 1964. The Venice Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Sites. In *Second International Congress of Architects and Specialists of Historic Buildings*.

- GREIVING, S., TIEDE, W., and KÜHN, M., 2021. Community-based disaster risk reduction and participatory approaches: Enhancing resilience of cultural heritage sites. *Journal of Community Resilience*, **23**(2), pp. 51-64.
- GRUBER, P., 2017. UNESCO and the protection of cultural heritage: Challenges and opportunities. *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development*, **7**(3), pp. 45-59.
- INPC, 2024. Informe sobre el patrimonio cultural de Ecuador: Estado actual y amenazas. Quito: Instituto Nacional de Patrimonio Cultural.
- JIGYASU, R., and CHMUTINA, K. (EDS.), 2023. *Routledge handbook on cultural heritage and disaster risk management*. Taylor & Francis.
- KERN, E., SHARMA, S., and TASEVSKA, T., 2021. Sustainability in urban conservation: A comprehensive approach to the protection of cultural heritage. *Environmental Conservation*, **48**(1), pp. 19-31.
- LABADI, S., PERLINGIERI, A., and WATERTON, E., 2021. Historic Cities and sustainable urban development: A global approach. *Heritage and Society*, **13**(2), pp. 57-78.
- PEREDES, F., ORTEGA, C., and GUZMÁN, R., 2020. Cultural heritage management and risk in Ecuador: Lessons from Guaranda and other heritage cities. *Journal of Heritage Conservation*, **32**(2), pp. 89-102.
- SADIQI, R., BASIOUNY, M., and TEFSEN, F., 2017. The 2016 Manabí earthquake in Ecuador: A lesson in risk management for cultural heritage. *International Journal of Disaster Management*, **22**(3), pp. 47-59.
- SÁNCHEZ-CALVILLO, A., ORTEGA-HERAS, J., and ALONSO-GUZMAN, E.M., 2025. Seismic Vulnerability Assessment of Mexican Vernacular Adobe Buildings: Application and Comparison of Different Methods. *International Journal of Architectural Heritage*, 1-22.
- SÁNCHEZ-CORTEZ, L., 2019. Patrimonio cultural y resiliencia en Ecuador: Un análisis del marco jurídico y su aplicación. *Revista de Derecho y Cultura*, **5**(1), pp. 72-86.
- SNGRE, 2025. Informe de gestión de riesgos en la provincia de Bolívar, 2024. Quito: Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias.
- SEVILLA, M., ALVARADO, T., and RUIZ, C., 2023. Strengthening community resilience through participatory risk assessment: The case of heritage conservation in Ecuador. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, **48**, pp. 1-14.
- UNITED NATIONS, 2015. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030. United Nations, Geneva. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030 | UNDRR. Available: <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030> [8/15, 2012].
- ZURITA, F., 2024. Geospatial approaches to heritage management in Ecuador's peripheral cities. *Journal of Geographic Information Science*, **19**(1), pp. 38-52.

DESIGN CRITERIA FOR ARTIFICIAL CONTROL TARGETS FOR POINT CLOUDS

CRITERIOS DE DISEÑO DE PUNTOS DE CONTROL ARTIFICIALES PARA NUBES DE PUNTOS

Francisco Javier Ariza-López^{a,*}, Juan Francisco Reinoso-Gordo^b, Juan José González-Quiñones^b,
Manuel Antonio Ureña-Cámara^a

^a Department of Cartographic, Geodesic and Photogrammetry Engineering, University of Jaén, Paraje de las Lagunillas s/n, 23071 Jaén, Spain.  fjariza@ujaen.es;  maurena@ujaen.es

^b Department of Architectonic and Engineering Graphic Expression, University of Granada, c/ Doctor Severo Ochoa s/n, 18001 Granada, Spain.  jreinoso@ugr.es;  juanjosegonzalez@ugr.es

How to cite: F.J. Ariza-López, J.F. Reinoso-Gordo, J.J. González-Quiñones y M.A. Ureña-Cámara. 2025. Design Criteria for Artificial Control Targets for Point Clouds. En libro de actas: *Quinto Congreso en Ingeniería Geomática*. Valencia, 2 – 3 de Julio de 2025. <http://dx.doi.org/10.4995/CIGeo2025.2025.19837>

Abstract:

The current relevance of artificial control targets (ACTs) in the field of point cloud capture using LiDAR techniques is highlighted. ACTs allow for quality assessment, calibration, adjustment and fusion. For this reason, having good and diverse design criteria for new ACTs is important. This paper reviews various ACTs proposals made from the beginning of the 21st century to the present day. Based on this review, a compilation of fifteen possible criteria to be taken into account when designing a new ACT has been generated. This proposal is relevant given that there is no guide or standard which offers possible criteria to be considered when designing a new ACTs.

Key words: LiDAR, Artificial control target, ACT

Resumen:

La relevancia actual de las dianas artificiales de control en el campo de la captura de nubes de puntos mediante técnicas LiDAR es destacada. Estas dianas permiten la evaluación de calidad, calibración, ajuste y fusión. Por esta razón, es importante contar con buenos y diversos criterios de diseño para nuevas dianas. Este artículo revisa diversas propuestas realizadas desde principios del siglo XXI hasta la actualidad. Basándose en esta revisión, se ha generado una compilación de quince posibles criterios a tener en cuenta al diseñar una nueva diana. Esta propuesta es relevante dado que no existe una guía o estándar que ofrezca criterios posibles para considerar al diseñar nuevas dianas.

Palabras clave: LiDAR, objetivos de control artificial, OCA

1. Introduction

The availability of LiDAR systems on aerial platforms (airplanes or UAVs) allows the capture of point clouds with numerous applications. Under ideal conditions, for years, state of the art LiDAR systems allow to achieve centimetric accuracy once the captured point clouds have been corrected for any errors present (e.g. navigation errors) (Csanyi and Toth 2007). So that point clouds facilitate the creation of precise metric models of the earth's surface, one of the classic objectives of photogrammetry which, since its early days, has been helped by the use of artificial control targets (ACT) (Clarke 1994; López-Cuervo 1980). In the case of absence of suitable elements in the environment, the use of ACTs allows this problem to be circumvented and provides the opportunity to assess absolute accuracy (Csanyi and Toth 2007). ACTs allow for quality assessment, calibration, adjustment and fusion

(Wilkinson *et al.* 2019). However, there are currently proposals for using amorphous objects (e.g. trees) present in the scene as targets (Kim *et al.* 2022). In any case, the ACTs can be used both in the production phase and in the quality control phase, and facilitate for rigorous surveys to be carried out (Flood *et al.* 2024).

An ACT is a visual mark that is placed in preselected locations, and with known precise coordinates, such that they materialize points that are used in the mathematical transformations to which the point clouds are subjected to provide them with a precise position, geometry and scale. The simplest form of ACT is a flat base with some kind of marking. Relevant aspects include size, shape (e.g., in the 2D case circular or square, hexagonal, etc., and in the 3D case spherical, cylindrical, trihedron, etc.), markings incorporated (crosses, checkerboards, stars, etc.) and finish (matte, gloss, color, etc.).

* Corresponding Author: Francisco Javier Ariza-López, fjariza@ujaen.es

Obtaining the highest accuracies in surveys requires the use of ground control and post-processing (Davidson *et al.* 2019). ACTs offer the capability to distinguish between accuracy and precision. Accuracy is provided by the correct identification of the ACTs and their centers and with an adequate number of targets, the appropriate mathematical transformations (rotations, translations, scale changes) can be carried out to place the point cloud in its true position corresponding to reality. Precision is approximated by determining the noise level with which the point cloud represents a test surface (e.g. impervious hard surface) (Flood *et al.* 2024). Manually taking ACT positions is labor-intensive and also prone to the introduction of errors and biases (Flood *et al.* 2024). For this reason, there is a great interest in automating the identification of ACTs and the derivation of the coordinates of the points they represent. Thus, each proposal for a new ACT includes, along with its geometric (size, shape) and radiative properties (coating), an algorithm specially designed to determine the center of the ACT (Csanyi and Toth 2007; Deng *et al.* 2019; Deng *et al.* 2023; Shi *et al.* 2021; Urbančič *et al.* 2019).

Numerous recent papers propose new ACTs (e.g. He and Seet 2002; Canavosio-Zuzelski *et al.* 2013; Luo *et al.* 2020; Qu *et al.* 2014, etc.). Each one of these researches indicate some basic guidelines for the design of the ACTs, covering aspects related to geometry, portability and ease of storage, economy, etc., but there is no guide that compiles and systematizes possible criteria. In fact, to the best of our knowledge, there is also no systematic classification of possible types of ACTs. Furthermore, in many research papers the new ACT is presented in a very direct manner, without a discussion of possible alternatives and without a simulation study or prior tests to confirm that a well-adjusted design is available. Additionally, the current interest in ACTs is evidenced by the large number of companies that manufacture them (e.g., Cody Corporation, South Survey, Sky High Bull's Eye, Candrone, Drone Points, GeoCue, etc.), which indicates a clear need in the market and also a business opportunity.

The use of targets in the photogrammetric field (e.g., USAF 1951, Siemens Star, etc.) has been common for decades. These targets have been focused on evaluating the resolving power of imaging systems. It is noteworthy that there are standards for the definition of the targets (e.g., USAF 1951) and handbooks explaining the use of those targets (e.g., Geary 1993; Malacara 2007). However, there is nothing similar for ACTs, there are no standards that establish their design or documented methods that systematize the use. The situation briefly described above indicates the need to address the compilation of criteria and guidelines for the proposal and evaluation of new ACTs. Authors such as (Davidson *et al.* 2019) explicitly indicate the need to conduct studies on ACT specific to LiDAR surveys.

The objective of this paper is to offer a compilation of possible design criteria for ACTs that can be used as a guideline for the proper design of new ACTs in a more systematized way.

First, a compilation of papers in which ACTs have been proposed is made. This review covers from the beginning of the 21st century to the present.

Subsequently, based on the works presented, a compilation of all the design criteria that appear in these papers has been generated. There are explicit criteria and implicit criteria; but in any case, an attempt has been made to compile all the design suggestions that appear in these papers. For each criterion, a brief explanation of its meaning will be made. Finally, the conclusions that we consider most relevant are presented.

2. Artificial control targets for LiDAR point clouds

In this section, we present a review focused on papers related to the design, test or application of new ACTs for point clouds generated by LiDAR data. We do not limit ourselves exclusively to the case of aerial surveys, we also consider cases in which these are combined with ground surveys or with other techniques (e.g., RADAR), or even cases developed exclusively for TLS but which offer results or recommendations of interest for the case of aerial surveys. We follow a chronological order.

A relevant contribution is the work of Csanyi and Toth (2007). They propose the use of targets with a specific design for LiDAR in order to obtain high positional accuracies. In some previous works they present the simulations process in order to determine the optimal shape and size of the ACT. They offer some design guidelines, for instance, it is better a target with two concentric circles than just one, they give the relationship between the two concentric circles, and recommended the use of high contrast (e.g., B&W) between them and some elevation above the ground.

A very interesting proposal is that made by Pesci and Teza (2008). They analyze the problem generated by retroreflective materials and propose a target that takes advantage of the advantages they offer (easy recognition in the cloud of points), but without introducing the errors they generate. They propose a square, flat and white target combined with a low reflectance zone and retroreflective material.

Becerik-Gerber *et al.* (2011) evaluate three types of targets (sphere, paddle and paper targets) in relation to the accuracy of LiDAR data registration based on the registration error caused by different types of targets and their configuration. The result they reach is that the spheres are better than the paddle and that the paddles are better than the papers targets.

Williams *et al.* (2012) perform a test of TLS data georeferencing methods in the environment of a stadium. These are black and white square targets with a reflector in one corner. They offer some recommendations on retro-reflective targets.

The elevated target called "Hexagonal Retro-Reflective LiDAR ground Target (HRRT)" was proposed by Canavosio-Zuzelski *et al.* (2013), which consists of six bicycle-like reflectors at the ends of three aluminum arms mounted on a tripod with another reflector in the center. They indicate that it is suitable for low point densities.

Barragán-Zaque *et al.* (2019) use planar targets of eight different materials (black paper, wood, reflective tape, white paper, red paper, aluminum foil, etc.) and a

polystyrene hemisphere to evaluate the accuracy of a TLS.

Wilkinson *et al.* (2019) propose the use of targets with the form of pyramids. It is noted that a major advantage of this design is the ability to fold, making it easy to port and store.

Huang *et al.* (2021) propose the LiDARTag system for consistent use between images and LiDAR data. They target includes an AprilTag, a type of tag consisting of a grid of black and white squares, used in robotics and computer vision applications.

Huang *et al.* (2022) propose optimizing the shape of the targets to reduce quantification uncertainty. The idea is that the target should have a geometry with large gradients at the edges in order to increase their detectability and reduce their uncertainty.

Gibson (2023) works with the integration of Radar and LiDAR surveys and the use of a single target for both technologies. He analyzes the behavior of 3D targets that are shaped as a quadruple reflector of adjacent trihedrons.

The Figure 1 presents the most common geometries and configurations adopted in flat ACTs. The Figure 2 introduces some of the geometries adopted when using 3D ACTs.

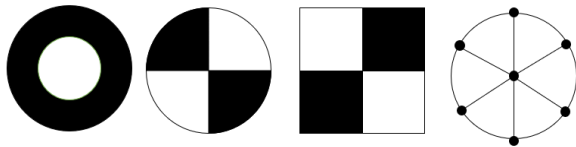


Figure 1: Most common geometries and configurations adopted in flat ACTs (representation without scale).



Figure 2: Some geometries adopted when using 3D ACTs (representation without scale).

3. Summary of design criteria

None of the works mentioned in the previous section makes a proposal for an ACT based on well-established and discussed design criteria. Each of the works proposes only a few criteria, so it is interesting to compile them and present them all together. In this way, the compilation can serve as a more complete guide for the proposal of new TCAs. Without ordering under any criteria or priority, the table presents each criterion and a brief explanation.

4. Discussion

This document presents a work in progress. A limited number of references have been analyzed, but they are relevant in that they have allowed numerous design criteria to be extracted and established from them. This was our objective, and it has been achieved. A broader

search of references will certainly allow more documents to be identified, and from them, more criteria to be determined, but the criteria outlined here are relevant. Another way to establish criteria could be through expert consultation. However, these alternatives remain for future work.

Table 1: Summary of main design criteria for ACTs

Criteria	Explanation
Light weight	Related to the mass of the TCA. It facilitates transport and handling. It can suppose a lower production cost
Ease of manage	Related to mass, shape and size. It facilitates transport and handling (e.g., the possibility of stacking the TCAs)
Smallest possible size	Related to size. Smaller sizes are lighter and more manageable
Sufficient size	Related to size. The size must be sufficient so that the surface of the ACT receives an adequate number of pulses
Rotational invariant	Related to shape. Since the target can be seen from different points of view, it is important that there are no favored or unfavorable directions in relation to the arrival of the laser pulses
Elevated from the ground	Related to relative elevation with respect to the ground. The relative elevation with respect to the ground offers a simple form of high separability (possibility of adequate filtering)
Two different reflectance	Related to surface finish. Two reflectances that have high contrast facilitate the identification of specific points (e.g., the center of a 2x2 checkerboard)
Ease of algorithmic detection	Related to geometric and/or radiometric configurations that allow an algorithm to automatically determine its center
Ease of manual chopping	Related to a geometric and radiometric configuration that allows an operator to mark its center
Ease of repair	Related to the possibility of carrying out repairs both in the field and in the office
Ability to regulate height	Possibility of easily changing the height above the ground at which the ACT is placed
Operability in all climates	No limitations of use with respect to climatic conditions
Ease of installation	Relating to the ACT being easy to install. Installation can be done on a tripod, pole, on the ground, etc. and may involve height adjustments, leveling, etc.
Location accuracy	Relative to allowing highly accurate location both on the ground (e.g., using a GNSS) and in determining its center (manually or algorithmically)
High edge detectability	Relating to the edges of the target being well registered for correct automatic detection

Regarding design criteria, the first thing that stands out in many references is that there is not always an explicit definition of the criterion. Discussion of the criteria

themselves is much less common. In general, when a reference proposes the design of a new ACT, it does not appear to follow a rigorous engineering or research process (e.g., establishing criteria with pros and cons, testing and trials, etc.). In addition, the references make no mention of following international standards (e.g., ISO standards) or any other type of standards, guides or specifications (e.g., from the ASPRS, ISPRS, etc.) for any of the design criteria. This is a clear weakness in the way the issue of ACT is being addressed in the LiDAR field.

Going into detail about the criteria indicated in Table 1, many of them are interrelated. Thus, in many cases, physical dependencies can be established between them (e.g., weight and size). The criteria indicated can be grouped into those related to: 1) size and shape, 2) reflective behavior, 3) range measurement behavior, 4) manual and automatic detectability, 5) handling and operability.

For many criteria, there are clear measures (e.g., weight [kg], size [m], reflectance [%], etc.), but other criteria require some type of measure that allows for comparing different ACTs under standard conditions. An example of a criterion that requires an adequate measure is ease of algorithmic detection. This is another area where research input is needed.

We believe that having well-established design criteria, with appropriate measures for each, will allow users to choose the best ACT for their use case. Users must be clear about is that there is no one ACT that is valid for all types of applications. For improved comparability and the possibility of selecting the best ACT, a set of design criteria, their defining measures, and standard comparison tests are required. This document aligns with this approach, being a first step in the design criteria.

5. Conclusions

The use of ACTs has been present in photogrammetry since its beginnings and has recently gained renewed

interest thanks to the expansion of LiDAR systems, both aerial and terrestrial. Interest in ACTs for point clouds began at the beginning of the 21st century. Documents are available from 2007 to date and the evolution shows the growing importance of using ACTs as a way of ensuring quality data or positioning capacity. It is also evident that there is a tendency for targets to be used by two or more survey systems (e.g., cameras and LiDAR or Radar and LiDAR), but taking into account the particularities of each one. The review shows the existence of multiple alternatives ranging from very simple targets to highly developed targets. In general, it is known that the use of edge effects (contrast) is necessary for targets to work properly. In some documents, more precise guidelines are found on how a target should be designed but, in general, the number of design criteria taken into account is very small. This work has compiled 15 criteria that can be taken into account when designing a new ACT proposal.

As indicated by Pesci and Teza (2008) "Actually, a universal target that is suitable for every kind of laser scanner survey does not exist, but each object is created to satisfy the demand of a specific application"; it is therefore important to have a well-defined set of criteria that can be used to establish the most appropriate ACTs for each situation/application.

Acknowledgements

This research has been partially funded by the Project: "Point-to-point quality in LiDAR data for Digital Terrain Elevation Models in Engineering" (PID2022-138835NB-I00) funded by MICIU/AEI/10.13039/501100011033/ and FEDER, UE. More information is available online: https://coello.ujaen.es/investigacion/web_giic/P2PQualiDEN/ (accessed on 4 December 2024).

References

- BARRAGÁN ZAQUE, W., HERRERA DE LA ROSA, L.L., and APARICIO PICO, L. E., 2019. Modelo para evaluación de la exactitud de escáner láser terrestre—TLS. *Revista Logos, Ciencia & Tecnología*, **12**(1). DOI: 10.22335/rict.v12i1.1019
- BECERIK-GERBER, B., JAZIZADEH, F., KAVULYA, G., and CALIS, G., 2011. Assessment of target types and layouts in 3D laser scanning for registration accuracy. *Automation in Construction*, **20**(5), pp. 649-658. DOI: 10.1016/j.autcon.2010.12.008
- CANAVOSIO-ZUZELSKI, R., HOGARTY, J., RODARMEL, C., LEE, M., and BRAUN, A., 2013. Assessing LiDAR Accuracy with Hexagonal Retro-Reflective Targets. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **79**(7), pp. 663-670. DOI: 10.14358/PERS.79.7.663
- CLARKE, T.A., 1994. Analysis of the properties of targets used in digital close-range photogrammetric measurement. *Videometrics III*, 2350, pp. 251-262. DOI: 10.1117/12.189137
- CSANYI, N., and TOTH, C.K., 2007. Improvement of LiDAR Data Accuracy Using LiDAR -Specific Ground Targets. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **73**(4), pp. 385-396. DOI: 10.14358/PERS.73.4.385
- DAVIDSON, L., MILLS, J.P., HAYNES, I., AUGARDE, C., BRYAN, P., and DOUGLAS, M., 2019. Airborne to UAS LiDAR: An analysis of UAS LiDAR ground control targets. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **XLII-2/W13**, pp. 255-262. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-255-2019

- DENG, F., RODGERS, M., XIE, S., DIXON, T.H., CHARBONNIER, S., GALLANT, E.A., LÓPEZ-VÉLEZ, C.M., ORDOÑEZ, M., MALSERVISI, R., VOSS, N.K., and RICHARDSON, J.A., 2019. High-resolution DEM generation from spaceborne and terrestrial remote sensing data for improved volcano hazard assessment—A case study at Nevado del Ruiz, Colombia. *Remote Sensing of Environment*, **233**, p. 111348. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111348
- DENG, X., WANG, S., ZHUANG, Y., FAN, Y., and ZHOU, Y., 2023. Evaluation of new target structure and recognition for point cloud registration and coordinates transformation of China's large double-span bridge. *Journal of Engineering and Applied Science*, **70**(1), p. 135. DOI: 10.1186/s44147-023-00308-3
- FLOOD, M., SEUBE, N., and WAGG, D., 2024. LiDAR Point Cloud Quality Control: Automating Accuracy and Precision Testing. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing (PE&RS)*, **90**(2), pp. 69-74. DOI: 10.14358/PERS.90.2.69
- GEARY, J.M., 1993. *Introduction to optical testing* (Vol. 15). SPIE press.
- GIBSON, S.M., 2023. Mensuration of Radar Targets in LiDAR Point Clouds. A thesis presented to the graduate school of the University of Florida in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of Science University of Florida 2023. Available: <https://ufdc.ufl.edu/ufe0059986/00001> [6/30, 2025].
- HE, D.M., and SEET, G.G.L., 2002. Novel underwater 3D-target design for measurement of depth of gating (DOG) in underwater LiDAR imaging (UWLI). *Proceedings of SPIE*, **4821**, p. 124. DOI: 10.1117/12.482185
- HUANG, J.K., CLARK, W., and GRIZZLE, J. W., 2022. Optimal Target Shape for LiDAR Pose Estimation. *IEEE Robotics and Automation Letters*, **7**(2), pp. 1238-1245. DOI: 10.1109/LRA.2021.3138779
- HUANG, J.K., WANG, S., GHAFARI, M., and GRIZZLE, J.W., 2021. LiDARTag: A Real-Time Fiducial Tag System for Point Clouds. *IEEE Robotics and Automation Letters*, **6**(3), pp. 4875-4882. DOI: 10.1109/LRA.2021.3070302
- KIM, M., STOKER, J., IRWIN, J., DANIELSON, J., and PARK, S., 2022. Absolute Accuracy Assessment of LiDAR Point Cloud Using Amorphous Objects. *Remote Sensing*, **14**(19), Article 19. DOI: 10.3390/rs14194767
- LÓPEZ-CUERVO, S., 1980. *Fotogrametría. Madrid, EGRAF SA*, 367, 68.
- LUO, Q., HU, M., ZHAO, Z., LI, J., and ZENG, Z., 2020. Design and experiments of X-type artificial control targets for a UAV-LiDAR system. *International Journal of Remote Sensing*, **41**(9), pp. 3307-3321. DOI: 10.1080/01431161.2019.1701210
- MALACARA, D., 2007. *Optical Shop Testing*. John Wiley & Sons, Inc. DOI: 10.1002/9780470135976
- PESCI, A., and TEZA, G., 2008. Terrestrial laser scanner and retro-reflective targets: An experiment for anomalous effects investigation. *International Journal of Remote Sensing*, **29**(19), pp. 5749-5765. DOI: 10.1080/01431160802108489
- QU, W., WANG, C., WANG, H., CHENG, M., and LI, J., 2014. Triple-Surface Structure Extraction and Fitting for Control Point Positioning in LiDAR Point Clouds. *Proceedings of International Conference on Internet Multimedia Computing and Service*, pp. 136-139. DOI: 10.1145/2632856.2632934
- SHI, Y., ZHAO, G., WANG, M., XU, Y., and ZHU, D., 2021. An Algorithm for Fitting Sphere Target of Terrestrial LiDAR. *Sensors*, **21**(22), p. 7546. DOI: 10.3390/s21227546
- URBANČIČ, T., ROŠKAR, Ž., KOSMATIN FRAS, M., and GRIGILLO, D., 2019. New Target for Accurate Terrestrial Laser Scanning and Unmanned Aerial Vehicle Point Cloud Registration. *Sensors*, **19**(14), p. 3179. DOI: 10.3390/s19143179
- WILKINSON, B., LASSITER, H.A., ABD-ELRAHMAN, A., CATHY, R.R., IFJU, P., BROADBENT, E., and GRIMES, N., 2019. Geometric Targets for UAS LiDAR. *Remote Sensing*, **11**(24), p. 3019. DOI: 10.3390/rs11243019
- WILLIAMS, K.E., OLSEN, M.J., and CHIN, A., 2012. Accuracy assessment of geo-referencing methodologies for terrestrial laser scan site surveys. In *Proceedings, ASPRS Annual Conference, Sacramento, California, 19–23 March*.