

MAPPING

VOL. 29 • Nº 204 • 2021 • ISSN: 1131-9100



Identificación de restos de explosivos de guerra mediante análisis multiespectral de Anomalías RX y detección de blancos

Metodología para evaluar la susceptibilidad a los deslizamientos y la licuefacción de suelos, inducidos por terremotos para Cuba suroriental

La división político administrativa en Cuba; antecedentes y actualidad

La evolución del posicionamiento. Una historia de superación

Incertidumbre en el análisis multitemporal en terrenos escarpados debido al uso de MDE

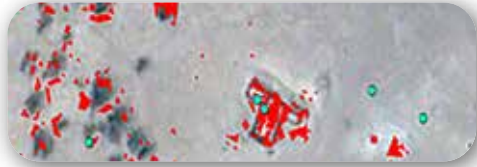
Elaboración de mapas de creación abierta para la formación de ingenieros hidráulicos. Caso de estudio Isla Nerá

Caso de estudio: Isla Nerá

MAPPING

VOL. 29 N° 204 2021 ISSN 1131-9100

Sumario



Pág. 4

Identificación de restos de explosivos de guerra mediante análisis multiespectral de anomalías RX y detección de blancos. *Identification of explosive remnants of war by multispectral analysis of rx anomalies and target detection*

Gonzalo Escobar Arévalo



Pág. 14

Metodología para evaluar la susceptibilidad a los deslizamientos y la licuefacción de suelos, inducidos por terremotos para Cuba suroriental. *Methodology to evaluate the susceptibility to landslides and liquefaction of soils, induced by earthquakes for southeast Cuba*

Sandra Y. Rosabal Domínguez, Alina Rodríguez Infante, José A. Zapata Balanqué



Pág. 24

La división político-administrativa en Cuba; antecedentes y actualidad. *The political administrative division in Cuba; background and current*

Dr. C. Elier Méndez Delgado, Ms C. María del Carmen Lloret Feijóo



Pág. 30

La evolución del posicionamiento. Una historia de superación. *The evolution of positioning. A history of overcoming*

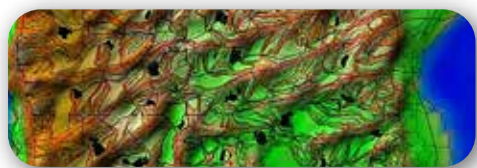
Marcelino Valdés Pérez de Vargas



Pág. 40

Incertidumbre en el análisis multitemporal en terrenos escarpados debido al uso de MDE. *Uncertainty in multitemporal analysis in steep terrain due to the use of DEM*

Joan J. Rodríguez Jordana, M^a Amparo Núñez Andrés, Felipe Buill Pozuelo



Pág. 54

Elaboración de mapas de creación abierta para la formación de ingenieros hidráulicos. Caso de estudio: Isla Nerá. *Elaboration of open creation maps in the teaching of hydraulic engineering. Isla Nerá case study*

Lic. Fernando Fernández Valenciano, Ing. Abel Dorta Armaignac, Ing. Juan Ramón Castellanos González, Dr. C. Yamilé Mesa Barrera



Pág. 66

Historia de la cartografía



Pág. 74

Mundo tecnológico

Pág. 78

Mundo editorial

El conocimiento de hoy es la base del mañana

MAPPING es una publicación técnico-científica con 29 años de historia que tiene como objetivo la difusión de las investigaciones, proyectos y trabajos que se realizan en el campo de la Geomática y las disciplinas con ella relacionadas (Información Geográfica, Cartografía, Geodesia, Teledetección, Fotogrametría, Topografía, Sistemas de Información Geográfica, Infraestructuras de Datos Espaciales, Catastro, Medio Ambiente, etc.) con especial atención a su aplicación en el ámbito de las Ciencias de la Tierra (Geofísica, Geología, Geomorfología, Geografía, Paleontología, Hidrología, etc.). Es una revista de periodicidad bimestral con revisión por pares doble ciego. MAPPING está dirigida a la comunidad científica, universitaria y empresarial interesada en la difusión, desarrollo y enseñanza de la Geomática, ciencias afines y sus aplicaciones en las más variadas áreas del conocimiento como Sismología, Geodinámica, Vulcanología, Oceanografía, Climatología, Urbanismo, Sociología, Planificación, Historia, Arquitectura, Arqueología, Gobernanza, Ordenación del Territorio, etcétera.

La calidad de la geotecnología hecha revista

MAPPING is a technical- scientific publication with 29 years of history which aims to disseminate the research, projects and work done in the framework of the disciplines that make Geomatics (GIS, Cartography, Remote Sensing, Photogrammetry, Surveying, GIS, Spatial Data Infrastructure, Land Registry, Environment, etc.) applied in the field of Earth Sciences (Geophysics, Geology, Geomorphology, Geography, Paleontology, Hydrology, etc.). It is a bimonthly magazine with double-blind peer review. MAPPING is aimed at the scientific, academic and business community interested in the dissemination and teaching of Geomatics and their applications in different areas of knowledge that make up the Earth Sciences (Seismology, Geodynamics, Volcanology, Urban Planning, Sociology, History, Architecture Archaeology , Planning, etc.)

MAPPING

VOL.29 Nº204 2021 ISSN 1131-9100

DISTRIBUCIÓN, SUSCRIPCIÓN Y VENTA

eGeoMapping S.L.
C/ Arrastaria 21.
28022. Madrid. España
Teléfono: 91 006 72 23
info@revistamapping.com
www.revistamapping.com

MAQUETACIÓN

elninjafluorescente.es

IMPRESIÓN

Podiprint

Los artículos publicados expresan solo la opinión de los autores. Los editores no se identifican necesariamente con las opiniones recogidas en la publicación. Las fotografías o imágenes incluidas en la presente publicación pertenecen al archivo del autor o han sido suministradas por las compañías propietarias de los productos. Prohibida la reproducción parcial o total de los artículos sin previa autorización y reconocimiento de su origen. Esta revista ha sido impresa en papel ecológico.



FOTO DE PORTADA:

Escaneado con LiDAR terrestre GLS-2000 de Topcon en cuevas de Castrocotrigo.

Autor: eGeoMapping S.L.

Depósito Legal: M-14370-2015
ISSN: 1131-9100 / eISSN: 2340-6542

Los contenidos de la revista MAPPING aparecen en: Catálogo BNE, CIRC, Copac, Crue- Red de Bibliotecas REBIUN, Dialnet, DULCINEA, EBSCO, GeoRef, Geoscience e-Journals, Gold Rush, Google Académico, ICYT-CSIC, IN-RECS, Latindex, MIAR SHERPA/RoMEO, Research Bible, WorldCat.

PRESIDENTE

Benjamín Piña Patón

DIRECTOR

Miguel Ángel Ruiz Tejada
maruiz@egeomapping.com

REDACTORA JEFA

Marta Criado Valdés
mcriado@egeomapping.com

CONSEJO DE REDACCIÓN

Julián Aguirre de Mata
ETSITGC. UPM. Madrid

Manuel Alcázar Molina
UJA. Jaén

Marina A. Álvarez Alonso
ETSII. UPM. Madrid

Gersón Beltrán
FGH. UV. Valencia

Carlos Javier Broncano Mateos
Escuela de Guerra del Ejército. Madrid

José María Bustamante Calabuig
Instituto Hidrográfico de la Marina. Cádiz

Joan Capdevilla Subirana
Área de Fomento de la Delegación del Gobierno. Cataluña

Antonio Crespo Sanz
Investigador

Efrén Díaz Díaz
Abogado. Bufete Mas y Calvet. Madrid.

Mercedes Farjas Abadía
ETSITGC. UPM. Madrid

Carmen Femenia Ribera
ETSIGCT. UPV. Valencia

Javier Fernández Lozano
Fac. Ciencias. USAL. Salamanca

M^a Teresa Fernández Pareja
ETSITGC. UPM. Madrid

Carmen García Calatayud
Biblioteca Nacional de España

Florentino García González
Abogado

Diego González Aguilera
EPSA. USAL. Salamanca

Álvaro Mateo Milán
CECAF. Madrid.

Israel Quintanilla García
ETSIGCT. UPV. Valencia

Antonio Federico Rodríguez Pascual
CNIG. Madrid

Pilar Sanz del Río
URBASANZ Estudio Jurídico S.L.

Roberto Rodríguez-Solano Suárez
EUITF. UPM. Madrid

Andrés Seco Meneses
ETSIA. UPNA. Navarra

Cristina Torrecillas Lozano
ETSI. US. Sevilla

Antonio Vázquez Hoehne
ETSITGC. UPM. Madrid

CONSEJO ASESOR

Ana Belén Anquela Julián
ETSICT. UPV. Valencia

Maximiliano Arenas García
Acciona Infraestructuras. Madrid

César Fernando Rodríguez Tomeo
IPGH. México

Ignacio Durán Boo
Ayuntamiento de Madrid

Francisco Javier González Matesanz
IGN. Madrid

Ourania Mavrantza
KTIMATOLOGIO S.A. Grecia

Julio Mezcua Rodríguez
Fundación J. García-Siñeriz

Ramón Mieres Álvarez
TOPCON POSITIONING SPAIN. Madrid

Benjamín Piña Patón
Área de Fomento de la Delegación del Gobierno. Cantabria

Jesús Velasco Gómez
ETSITGC. UPM. Madrid

Identificación de restos de explosivos de guerra mediante análisis multiespectral de anomalías RX y detección de blancos

REVISTA **MAPPING**
Vol. 29, 204, 4-13
2021
ISSN: 1131-9100

Identification of explosive remnants of war by multispectral analysis of RX anomalies and target detection

Gonzalo Escobar Arévalo

Resumen

El presente trabajo pretende contribuir al desarrollo de una estrategia metodológica con herramientas de teledetección, que permita identificar las zonas con presencia de explosivos remanentes de guerra (REG). Para ello se han realizado análisis desde el paradigma de las anomalías espectrales, utilizando la familia de algoritmos RX y de Detección de Blancos, para clasificación de píxeles en una imagen de alta resolución multiespectral. El procesamiento de la información implicado, inicialmente, tomar muestras de referencias asociadas a infraestructura militar. Los resultados de cada análisis han sido depurados y recalibrados estableciendo parámetros para acotarlos y redefinir zonas. Los datos de salida han sido combinados y contrastados, lo cual nos ha permitido elaborar una cartografía con subzonas (39) de probable presencia de REG, a las cuales se les a realizado un *buffer* (zona de influencia) de 25 m, sobre grupo de anomalías espectrales. Considerando la accesibilidad, se tomaron 5 subzonas para ser analizadas en terreno.

Abstract

Since the launch of Sentinel 1 in April 2014, the European programme The present work aims to contribute to the development of a methodological strategy with remote sensing tools to identify areas with the presence of explosive remnants of war (ERW). For this purpose, analyses were carried out from the paradigm of spectral anomalies, using the RX and Target Detection family of algorithms for pixel classification in a high-resolution multispectral image. The processing of the information involved, initially, taking reference samples associated with military infrastructure. The results of each analysis were refined and recalibrated, establishing parameters to narrow them down and redefine zones. The output data were combined and contrasted, which allowed us to elaborate a cartography with sub-zones (39) of probable ERW presence, to which a buffer (influence area) of 25 m was projected, on a group of spectral anomalies. Considering the accessibility, 5 sub-zones were taken to be analyzed in the field.

⁽¹⁾El presente artículo expone los resultados de la investigación de Tesis de grado presentada por Gonzalo Escobar A. y Erika Villamil P., en conformidad con los requisitos para obtener el grado de Magíster en Geomática de la Universidad de Santiago de Chile el año 2016.

Palabras clave: Explosivos remanentes de Guerra, Anomalías espectrales, Algoritmo RX, Detección de blancos.

Keyword: Explosive remnants of War, Spectral anomalies, Rx algorithm, Target detection.

Universidad de Santiago de Chile
gonzaloescobarbd@gmail.com

Recepción 30/04/2021
Aprobación 17/05/2021

1. INTRODUCCIÓN

El asunto de las REG¹ resulta ser un problema complejo de alcance mundial, pues en muchos países, las municiones y los artefactos explosivos abandonados y sin detonar son una amenaza para la seguridad de las personas. Aquí se incluyen las bombas, los morteros, los misiles u otros artefactos que no estallan al instante, pero permanecen en estado volátil y pueden ser mortales si son tocados o removidos. Esto adquiere trascendencia si consideramos que puede asegurarse que el número total de municiones sin estallar en todo el mundo supera el de las minas terrestres.

Para enfrentar esta situación se han desarrollado múltiples métodos asociados a la detección de metales (dominio de frecuencia, dominio en tiempo y VLF) y también a técnicas de clasificación de patrones (lógica difusa y redes neuronales). Paralelamente, se han diseñado métodos utilizando animales (perros, ratas, abejas, etc.), y técnicas de radar y sensores espectrales. Respecto a este último método, es constatable el aumento en investigación y el desarrollo de proyectos que han derivado en óptimos resultados, sobre todos aquellos que se refuerzan con datos de otro tipo de sensores.

De forma paralela, en las últimas décadas algunos investigadores han desarrollado esfuerzos para tratar el tema de las anomalías espectrales. Una serie de enfoques han definido esta técnica de análisis, desde métodos de clasificación supervisados rígidos hasta algoritmos de clasificación específica, no supervisados que buscan identificar puntos de anomalía. Su orientación hacia la resolución de problema de los restos de explosivos de guerra es relativamente nueva y por lo general utilizada en el tratamiento de imágenes hiperespectrales. En relación con lo anterior es fundamental destacar que uno de los elementos en común a casi todos los algoritmos de clasificación de anomalías radica en el hecho de concebirlas en una lógica de representación de distribución normal multivariante o gaussiana.

Los trabajos de Witherspoon y Holloway (1995), C. I. Chang y S. S. Chiang (2001), Liao, Chen & Baertlein (2001),

A. P. Schaum, and A. D. Stocker (2002), D. W. J. Stein, S. G. Beaven, L. E. Hoff, E. M. Winter (2002), Qiandong Guo, Bing Zhag, Qiong Ran, Lianru Gao y Antonio Plaza (2014) han sido pioneros en esta materia desarrollando la línea investigativa abierta por Red y X. Yu, quienes desarrollaron el algoritmo RX, denominado así por las iniciales de los nombres de sus creadores. Su objetivo es la identificación de diferencias espectrales respecto al fondo de la imagen.

Otro enfoque en el estudio de las anomalías espectrales ha sido la denominada «detección de blancos supervisada». Esta metodología se basa en la premisa de que las características espectrales de destino se definen generalmente por la definición de un solo espectro objetivo (píxel o polígono) o un subespacio objetivo. Similar a las técnicas de entrenamiento, la detección de blancos opera a partir de la definición de muestras (objetivo) cuyo comportamiento espectral es identificado en la imagen (H. Ren y C.-I Chang, 2000; D. Manolakis, D. Marden y GA Shaw, 2003). Una serie de trabajos que han profundizado en el rendimiento de los distintos algoritmos de detección de blancos y realizando comparaciones entre estos (A. Camacho, C. Vargas, H. Argueyo, 2016; Q- Guo, R. Pu, J. Cheng, 2016; M. Fahad, M. Hy, Y Zhang, 2017).

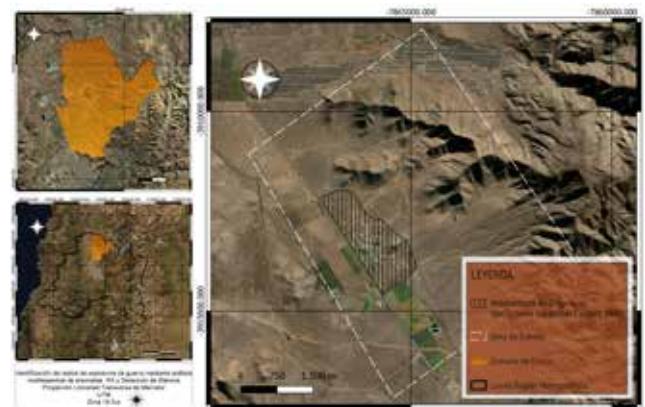
La presente investigación busca obtener resultados óptimos utilizando una imagen multispectral de alta resolución definiendo parámetros específicos para la identificación de REG en la zona de estudio.

2. MATERIAL Y MÉTODO

2.1 Zona de estudio

Nuestro estudio se desarrolló en la localidad de Peldehue al norte de la comuna de Colina. Esta comuna está localizada en el sector noreste de la Región Metropolitana (Figura N°1), a 14 km al norte de Santiago (centro). Pertenece a la provincia de Chacabuco, y es la capital Provincial. Ella se encuentra delimitada por las latitudes 32° 21 minutos y 32° 57 minutos Sur, y por las longitudes 70° 24 minutos y 70° 10

¹Los explosivos remanentes de guerra corresponden al conjunto de artefactos explosivos como bombetas de racimo, proyectiles de artillería, morteros, etc., que no explotan con éxito o que, por diversas razones quedan emplazados en terreno, siendo potencial su estallido. Las REG se agrupan, por tanto en dos grandes categorías: AXO y UXO. Axo es la abreviación de *Abandoned Explosive Ordnance* (Artefactos explosivos abandonados), es decir los artefactos explosivos que no se han utilizado durante un conflicto armado, que han sido abandonados o desechados por una parte en un conflicto armado y que ya no están bajo el control del partido que los dejó atrás o los tiró. Artefactos explosivos abandonados que pueden o no haber sido cebado, fusionado, armados o preparados de otro modo para el uso. Por su parte, UXO es la sigla abreviada de *Unexploded Ordnance* (Artefactos sin explotar), que se refiere a cualquier artefacto explosivo que se ha cebado, fusionado, armado o preparado de otra forma o utilizado. Puede haber sido disparado, dejado caer, lanzado o proyectado, aún permanece sin explotar debido a un mal funcionamiento, diseño o por cualquier otra razón.



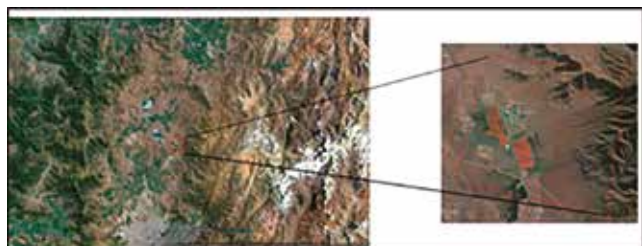


Figura 2. Instalaciones de la Brigada de Operaciones Especiales Lautaro

minutos Oeste. Para el desarrollo de nuestra investigación se ha definido un área de 25 km², correspondientes a un sector de la localidad de Peldehue en el cual se encuentran emplazadas las instalaciones de la Brigada de Operaciones Especiales Lautaro del Ejército de Chile (Figura N°2).

La Brigada de Operaciones Especiales Lautaro (BOE) es un complejo orgánico militar integrado por 11 unidades, y fue fundada el año 2008. Localizado en el conocido ex fuerte Arteaga, la zona en donde se encuentra emplazada la brigada se caracteriza por ser históricamente un lugar en el cual se han desarrollado ejercicios y maniobras de las diferentes unidades del ejército. Año tras año son entrenadas las fuerzas de élite del ejército de Chile. Según las indagaciones, durante los últimos 5 años en este lugar se habría utilizado armamento de infantería (Mortero 60 mm y 81 mm) y artillería.

2.2 Sistema Pléiades

Para el desarrollo de este trabajo se ha optado por trabajar con una imagen de alta resolución Pléiades del

15 de enero del año 2015. El sistema Pléiades suministra productos ópticos de muy alta resolución en un tiempo récord, con capacidad de revisita diaria sobre cualquier punto del planeta para dar mejor respuesta a los requisitos tanto civiles como militares.

Se basa en satélites más pequeños, más baratos y ágiles que sus predecesores. Los dos satélites Pléiades se situarán sobre una órbita en fase con SPOT 6 y 7, los sucesores de SPOT 5. La constelación de los cuatro satélites ofrecerá una combinación ideal de detalle y cobertura, cuya plataforma está actualmente en activo en casi todos los programas europeos de observación de órbita baja (entre otros, ERS, Envisat, MetOp y Helios). Pléiades integra tecnología innovadora, como los actuadores giroscópicos, por ejemplo, que por primera vez en Europa llevarán los satélites de este programa para proporcionar unas prestaciones sin precedentes.

Los dos satélites Pléiades forman el componente óptico del sistema de observación francoitaliano de doble uso civil/militar Orfeo (Italia aporta el componente radar Cosmo-SkyMed). El programa se está desarrollando bajo la responsabilidad de la agencia espacial francesa, CNES. Airbus Defence and Space es el contratista principal para el diseño, desarrollo, construcción y suministro de los dos satélites (<http://www.geo-airbusds.com>).

2.3 Metodología

El desarrollo de nuestra investigación apunta a diseñar

Tabla N°1. Pléiades. Características técnicas.

PLÉIADES 1A - 1B					
Bandas	1	2	3	4	5
Resolución espacial	2 m	2 m	2 m	2 m	0,50 cm
Resolución espectral (nm)	590	500	430	740	470
	710	620	550	940	830
	RED	GREEN	BLUE	IR Cercano	Pancromat
Resolución radiométrica	12 bits/píxel				
Ancho de barrido	20 km				
Tamaño de escena	100 x 100 km				
Pares estéreo	SI				
Revisita	DIARIA				
Programable	SI				
Altitud	694 km				
Formato de entrega	GeoTIFF o TIFF				
Lanzamiento	Pléiades 1A : diciembre 2011 - Pléiades 1B: diciembre 2012				

una estrategia analítica que permita disminuir el tiempo en el proceso de identificación de áreas peligrosas confirmadas (CHA)² y áreas peligrosas definidas (DHA), que pueda ser aplicable a diferentes contextos geográficos, sobre todo en aquellos lugares que dada las características de sus suelos o su vegetación presenten grados de visibilidad propicios para detectar los restos de explosivo mediante análisis multiespectral. En este sentido nuestro proyecto se insertaría dentro de lo que se denomina, en el glosario técnico definido por las directrices internacionales de desminado (International Mine Action Standards-IMAS), como Estudio Técnico.

Tomando como base a lo anterior se ha trabajado a partir de cadenas de procesamiento de información multiespectral divididas en 5 etapas: corrección radiométrica; corrección geométrica; extracción de características y conformación de muestras; análisis RX, y análisis detección de blancos.

Para los propósitos de nuestra investigación definimos siete clases: suelo desnudo, espinos, zinc, metal 1, metal 2, asfalto desgastado y pastizal. Para la realización de anomalías espectrales se comenzó aplicando los algoritmos RXD, UTD y su variante híbrida RXD-UTD. La familia de algoritmos RX se expresan de la siguiente forma:

$$\delta_{RXD}(r) = (r - \mu)^T K_{L \times L}^{-1} (r - \mu)$$

$$\delta_{UTD}(r) = (I - \mu)^T K^{-1} (r - \mu)$$

$$\delta_{RXD-UTD}(r) = (r - 1)^T K_{L \times L}^{-1} (r - \mu)$$

Los resultados de la aplicación de los algoritmos RX permiten deducir que tanto su RXD como su variable RXD-UTD no expresan variaciones significativas. Sin embargo, el comportamiento del análisis de anomalías aplicado con UTD da cuenta de una variación significativa, en relación con los otros clasificadores.

De esta manera se calcularon patrones de agrupamiento de píxeles (i-moran - getis-ord g) y zonas calientes (c de geary) definidas por una alta variabilidad entre el valor de un píxel y los datos circundantes. Una característica

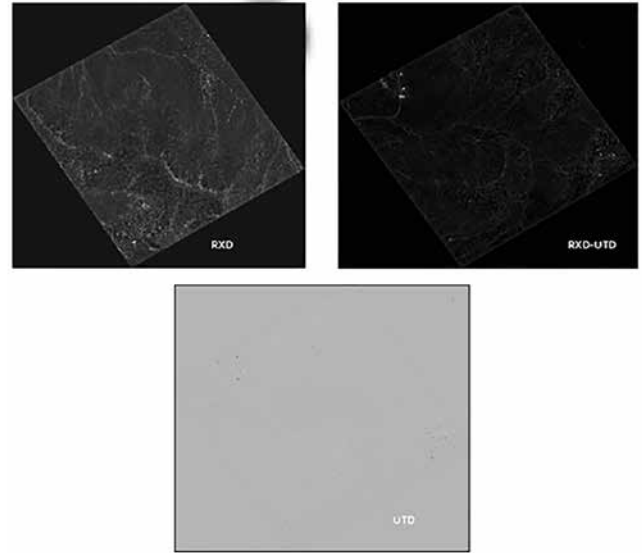


Figura 3. Resultado aplicación de los tres índices de clasificación.

común a todas las clasificaciones preliminares es que, en mayor o menor medida, según el parámetro de clasificación, los resultados del análisis de anomalías mostraron algún grado de heterogeneidad presentándose valores diferentes a los de fondo en distintos rangos espectrales. Aun así, UTD se perfiló como el mejor algoritmo de clasificación. Es posible presumir que esta variabilidad se debe a la presencia de elementos de distinto material respecto del «valor suelo» como así también a «anomalías de fondo», es decir valores que siendo suelo se encuentran alterados por alguna condición en particular que lo diferencia del resto de los píxeles agrupados en esta categoría como humedad y/o sequedad, sombras, vegetación enfermiza, rocas aisladas, huellas de explosión, etc.

Para afinar la definición de anomalías se procedió a realizar un análisis de detección de blancos utilizando distintos métodos: *Matched filtering (MF)*; *Constrained Energy Minimization (CEM)*; *Adaptive Coherence Estimation (ACE)* y *Spectral Angle Mapper (SAM)* y *Orthogonal Subspace Projection (OSP)*. Los algoritmos de clasificación de detección de blancos se expresan:

$$D_{MF}(x) = \frac{(d - \mu)^T \Gamma^{-1} (x - \mu)}{(d - \mu)^T \Gamma^{-1} (d - \mu)}$$

$$D_{CEM}(x) = \frac{d^T \Gamma^{-1} x}{d^T \Gamma^{-1} d}$$

$$D_{ACE}(x) = \frac{(d^T \Gamma^{-1} x)^2}{(d^T \Gamma^{-1} d)(x^T \Gamma^{-1} x)}$$

$$D_{SAM}(x) = \frac{d^T x}{(d^T d)^{\frac{1}{2}} (x^T x)^{\frac{1}{2}}}$$

$$D_{OSP}(x) = \frac{d^T P_U^\perp x}{d^T P_U^\perp d}$$

²El IMAS 08.21 define a los estudios no técnicos como investigaciones de áreas peligrosas existentes o previamente registradas, siendo, por tanto, el punto de partida para el registro de las áreas peligrosas confirmadas (CHA) o áreas peligrosas sospechosas (SHA). Un área peligrosa sospechosa (SHA) se refiere a un área sospechosa de tener peligro de minas/REG. Un SHA puede ser identificado por medio de un estudio de impacto, otra forma de estudio nacional, o por la denuncia de la presencia de peligros explosivos. Por su parte el término Área Peligrosa Confirmada (CHA) se refiere a un área identificada por un estudio no técnico en el cual, la necesidad de una posterior intervención a través de un estudio técnico o de despeje ha sido confirmada. Por su parte el término área peligrosa definida (DHA) hace referencia a un área, generalmente dentro de un CHA que requiere de un despeje completo. Una DHA normalmente es identificada a través de un minucioso estudio.

Para la ejecución del análisis de detección de blancos se definieron valores de fondo que son aquellos que serán sustraídos dentro del proceso de clasificación a fin de afinar los blancos definidos. A cada clasificador se le aplicó **Fración Mínima de Ruido (MNF)**.

Posteriormente se realizó la conversión de estos datos de anomalías a formato ráster, los cuales fueron agrupados a partir de la superposición de los resultados por cada método, conservando los valores coincidentes de los diferentes procesos que se realizaron por cada uno de ellos, incluyendo los resultados de la cadena de procesamiento en UTD.

A partir de estos puntos medios, procedimos a generar un *buffer* de 25 m, considerados como el área de influencia, donde potencialmente podríamos encontrar los objetos y materiales que constituían las anomalías detectadas, esto estimando el error geométrico que podría tener nuestra georreferenciación. Esto dio origen a 39 zonas anómalas, de las cuales constatamos 5 en terreno. Por último, en esta etapa, decidimos unir todos los resultados de las diferentes metodologías, para así definir una gran zona con anomalías. Como resultado elaboramos el siguiente mapa (Figura N° 5) con su respectivo listado de coordenadas, con el cual verificaríamos los datos en terreno.

Estos datos fueron comparados con el análisis UTD. Es

Tabla 2. Blancos para la aplicación de análisis de detección

Target	Definición
Metal 1 (Vehículo Militar)	Vehículo Militar 3m x 2m completo de metal (Fierro)
Metal 2 (garita)	Garita Militar de Metal 2m x 2m
Techos	Techos de Zinc infraestructura Militar
Cemento	Helipuerto Unidad Militar

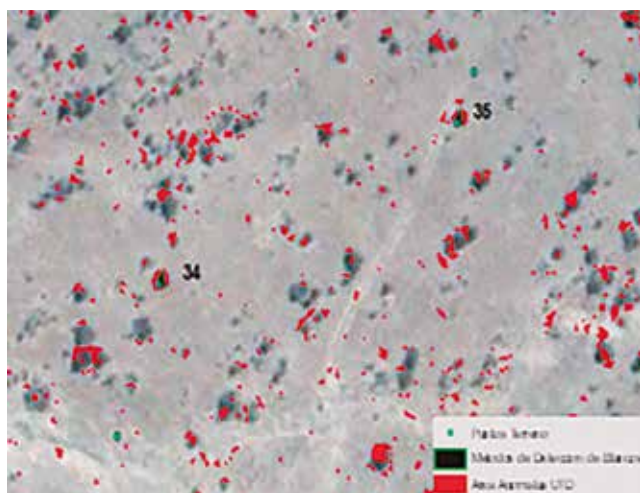


Figura 4. UTD-Detección de Blancos y puntos de Terreno Sub-zona 34-35.

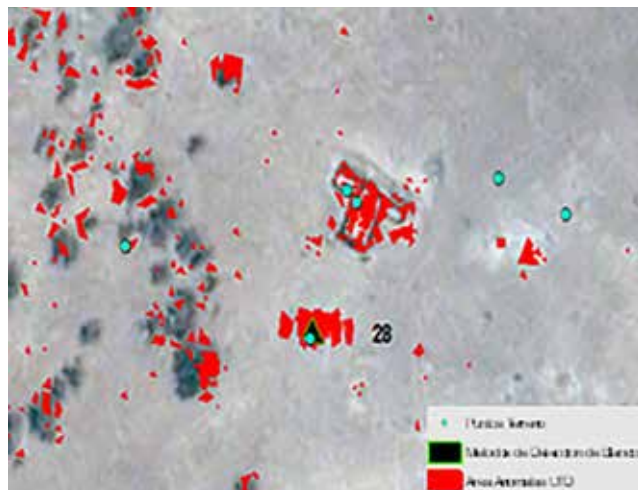


Figura 5. UTD-Detección de Blancos y puntos de Terreno Sub-zona 28.

importante destacar en ese sentido que existieron claras coincidencias en la detección de anomalías, sin embargo, creemos que el algoritmo UTD presenta un gran margen de ruido como consecuencia de la detección de suelo contaminado con material metálico.

Así y tomando como base criterios de accesibilidad se seleccionaron 5 subzonas para ser estudiadas en terreno:

1. Subzona 28
2. Subzona 29
3. Subzona 30
4. Subzona 34
5. Subzona 35

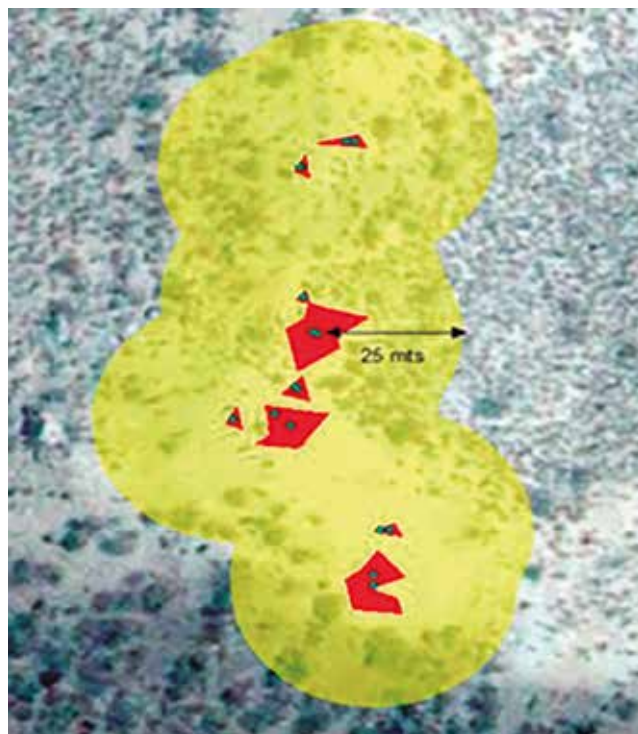


Figura 6. Distribución de anomalías espectrales y definición de buffer

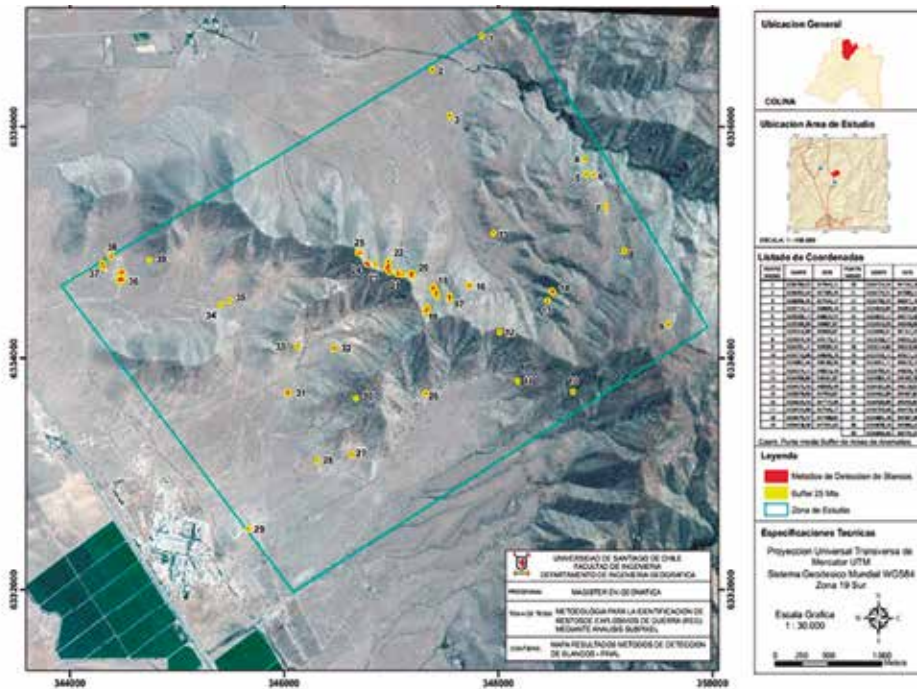


Figura 7. Métodos de Detección de Blancos - Mapa de Resultados Final.

Tabla 3. Métodos de Detección de Blancos - Coordenadas Finales

PUNTO MEDIO	NORTE	ESTE	PUNTO MEDIO	NORTE	ESTE
1	6336783,55	347844,11	20	6334724,34	347192,18
2	6336492,44	347385,45	21	6334725,51	347080,11
3	6336096,35	347544,27	22	6334790,25	346971,76
4	6335714,12	348809,10	23	6334810,89	346853,87
5	6335590,17	348815,57	24	6334815,12	346774,00
6	6335580,89	348887,87	25	6334910,09	346698,86
7	6335310,89	349003,87	26	6333696,91	347322,35
8	6334924,39	349179,21	27	6333168,27	346632,02
9	6334291,21	349585,42	28	6333114,86	346310,60
10	6333710,80	348696,70	29	6332526,12	345671,10
11	6333802,46	348180,90	30	6333652,71	346670,25
12	6334224,12	348013,10	31	6333700,32	346036,76
13	6334498,89	348461,87	32	6334083,43	346465,58
14	6334575,43	348505,49	33	6334101,06	346128,91
15	6335078,89	347953,87	34	6334462,89	345407,87
16	6334626,43	347725,96	35	6334500,89	345493,87
17	6334524,80	347546,27	36	6334703,68	344478,18
18	6334579,47	347408,82	37	6334802,18	344307,06
19	6334418,30	347331,62	38	6334878,10	344384,22
			39	6334846,66	344745,32

En cada subzona se procedió a realizar un rastreo en torno a los 25 metros de *buffer* definidos.

3. RESULTADOS

3.1. Subzona 29. Garita

En la subzona 29 localizamos una garita de guardia militar, similar a la que dio origen al *target* nº1. Las coordenadas que determinamos a partir del análisis de detección de blancos emplazó a solo 2,82 m aproximados, del punto medio del área anómala que habíamos definido.

3.2 Sub-Zona 28. Blanco de Barril

Dentro del área determinada como anómala nº 28 (subzona) localizamos un blanco de barril metálico, a solo 1,045 m aproximados de su punto medio. Adicionalmente dentro del área del *buffer* de influencia encontramos 2 blancos de barril dentro de un compartimento de madera de almacenamiento de materiales de polígono. Además, cerca de este lugar encontramos 3 elementos más, asociados a munición y metal, que decidimos registrar para nuestro proyecto.

3.3 Subzona 30. Explosivos remanentes de guerra (REG)

La subzona 30 arrojó excelentes resultados. En su perímetro encontramos de explosivos remanentes de guerra dentro a una distancia aproximada de 6,58 m del punto medio. Adicionalmente encontramos 6 artefactos explosivos adyacentes al área de influencia. Para esta zona es muy importante resaltar el hecho de que su relieve se caracteriza por tener fuerte pendiente (30° aprox.), por lo tanto, la probabilidad de que estos artefactos se desplacen es muy alta.

3.4 Subzonas 34 y 35. Restos de explosivos y blanco de barril

En el punto 34, encontramos restos de explosivos fuera del área de influencia, aproximadamente a 39 m del punto medio del área considerada anómala. La subzona 35 contenía un blanco de barril dentro de su área de influencia, aproximadamente a

Tabla N°4. Coordenadas punto 29, plano vs terreno

Punto Anomalía	Norte (WGS84)	Este (WGS84)	Distancia
29 – Plano	6332526,12	345671,10	2,82 m aprox.
29 – Terreno	6332524,00	345669,00	

Tabla N° 5. Coordenadas punto 28, plano vs terreno

Punto Anomalía	Norte (WGS84)	Este (WGS84)	Distancia
28 – Plano	6333114,85	346310,59	1,04 m aprox.
28 – Terreno	6333114,00	346310,00	
Punto 1	6333129	346271	
Punto 2	6333138	346318	
Punto 3	6333136	346320	
Punto 4	6333140	346350	
Punto 5	6333134	346364	

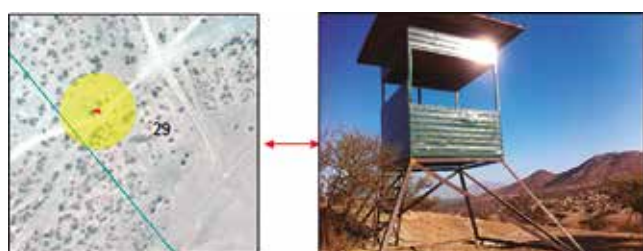


Figura 8. Punto 29. Garita.

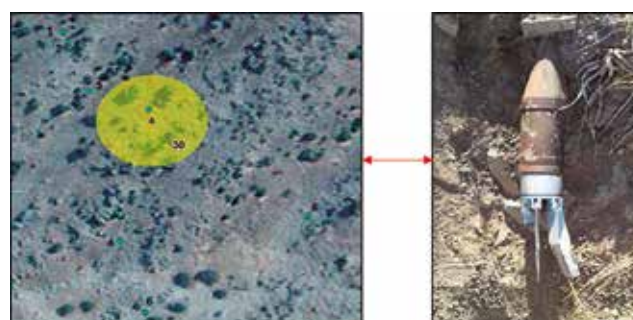


Figura 11. Subzona 30. Explosivos remanentes de guerra.

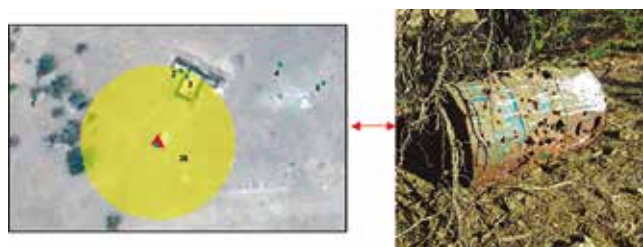


Figura 9. Punto 28. Blanco de barril



Figura 10. Almacén de blancos de barril.

11 m del punto medio. Debemos resaltar que estas áreas son cercanas a un sendero del recinto, por tanto, resulta ser una zona frecuentemente transitada, razón por la probabilidad de que estas entidades hayan sido desplazadas es muy alta.

Al finalizar con la comprobación de datos en terreno, quedamos muy satisfechos con los resultados, dado que en todas las subzonas en las cuales se exploró, localizamos algún tipo de elemento metálico asociado a material bélico. Además, casi todos estaban dentro del rango de zona de influencia preestablecida con el buffer de 25 m.

Todas las zonas revisadas pudieron ser confirmadas con la presencia de material metálico que varió desde 1 m hasta 50 cm de longitud. El material identificado por la combinación de métodos fueron barriles metálicos, morteros 60 mm, granadas explotadas y munición sin estallar de artillería. Considerando que el material abandonado también es parte de nuestro trabajo, es posible homologar, desde el punto de vista del desafío técnico, tanto lo barriles como los explosivos detonados como un buen resultado, pues

Tabla N° 6. Coordenadas punto 30, plano vs terreno

Punto Anomalía	Norte (WGS84)	Este (WGS84)	Distancia
30 – Plano	6333652,54	346670,31	6,58 m aprox.
30 – Terreno	6333659,00	346669,00	
Punto 1	6333701	346630	
Punto 2	6333696	346632	
Punto 3	6333669	346642	
Punto 4	6333587	346656	
Punto 5	6333601	346740	
Punto 6	6333548	346667	

Tabla N° 7. Coordenadas punto 34 y 35, plano vs terreno

Punto Anomalía	Norte (WGS84)	Este (WGS84)	Distancia
34 – Plano	6334462,88	345407,86	39,06 m aprox.
34 – Terreno	6334426,00	345395,00	
35 – Plano	6334500,88	345493,86	11,85 mts aprox.
35 – Terreno	6334512,00	345498,00	

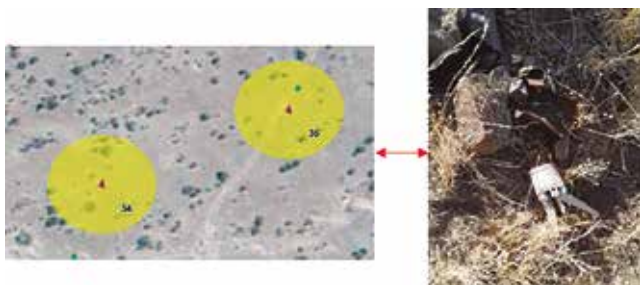


Figura 12. Subzona 34, explosivos remanentes de guerra.



Figura 15. Determinación de Áreas DHA, basado en resultados de campo.
 Figura 16. Áreas DHA y CHA.



Figura 13. Polígonos de Thiessen, a partir de áreas anómalas.
 Figura 14. Determinación de Área CHA, a partir de Polígonos de Thiessen.

perfectamente se podrían tratar de contenedores de armamento y explosivos o indicios de la presencia de REG, en la medida que el material explosado siempre nos permitirá esbozar inicialmente una zona sospechosa.

A partir de estos resultados desarrollamos un proceso de zonificación con el fin de establecer las zonas CHA. Para

ello se procedió a la generación polígonos de Thiessen, lo cual permite delimitar perímetros de polígonos a partir del cálculo de equidistancia respecto a los puntos vecinos, designando una zonificación pertinente para nuestro objetivo. Es importante destacar que para ello ignoramos los puntos medios de los polígonos finales de la metodología de detección de blancos, 1, 2, 3, 29, 36, 37, 38 y 39, dado que estos señalan clases conocidas como techos de edificaciones y por tanto solo interferirían en la determinación de la CHA.

Teniendo esta zona definida, y con los resultados de la corroboración en terreno, procedemos a determinar nuestras zonas DHA. Cabe destacar que no se incluirá la subzona 29, dado que incluye una garita. De esta forma los resultados fueron los siguientes:

Así se obtuvieron las siguientes áreas: Área Total DHA: 55,35 ha; Área Total CHA: 776,56 Ha; Área de Estudio: 1548,09 Ha.

DISCUSIÓN

Previo a la realización de este estudio cabía la posibilidad de encontrar restos de explosivos de guerra sin estallar (REG), pues se trata de una zona que hace más de 3 décadas ha sido el escenario de ejercicios militares. Según la recopilación de antecedentes, la munición que se podía encontrar era de mortero 60 mm y 81 mm, antitanque de diversos calibres, artillería 84 mm y granadas de mano. No era probable que se encontraran vestigios de pólvora, pues en la zona se realizan ejercicios de lanzamiento de mortero que no sobrepasa los 1 000 metros de distancia, razón por la cual no era necesaria la utilización de cargas de proyección. La exploración en terreno arrojó la presencia, precisamente de todo este tipo de munición, en la cual podríamos integrar los blancos barril que podrían perfectamente haber sido contenedores de armamento.

Si consideramos los blancos barriles como aciertos, en la medida que en otros escenarios de combate real esto podría ser un contenedor de explosivos, podemos afirmar que la zona se caracteriza por presentar bajos niveles de contaminación metálica. De todas formas, un elemento a considerar es una cantidad considerable de desecho de casquillos de balas de diverso calibre, proveniente de la utilización de munición de fusil en la zona como consecuencia de los constantes ejercicios de combate de las fuerzas especiales en el área. Es necesario evaluar el comportamiento espectral de zonas con casquillos a fin de reducir los falsos positivos.

Nuestra investigación arrojó 39 subzonas en las que se presentaron anomalías espectrales. Como ya explicábamos, por razones de accesibilidad solo se pudieron evaluar 5 de ellas las cuales presentaron material metálico de diverso origen. Desde el punto de vista de los riesgos, nuestro estudio establece que si bien se trata de un campo militar, la presencia de armamento sin estallar, constituye un serio peligro para las tropas que ahí se asientan, pues en primer término, las entidades explosivas halladas se encuentran a poca distancia de los edificios del recinto y además se presentan en zonas donde las unidades realizan sus maniobras de entrenamiento, lo cual aumenta el riesgo.

Por otro, lado, pese a que las restantes zonas se encuentran alejadas de las unidades militares y de áreas habitadas, es sabido que estos lugares son constantemente explorados por aficionados al andinismo y por lugareños, lo cual constituye un problema que, si bien no es alarmante, resulta ser bastante preocupante. El año 2000, dos jóvenes resultaron heridos como consecuencia de la manipulación de un artefacto explosivo sin estallar dentro de los terrenos militares de Peldehue. Asimismo, el año 2003 un civil resultó fallecido como consecuencia de la manipulación de estos artefactos.

En síntesis, nuestra investigación logro establecer la presencia de REG a partir de análisis multiespectral en base a RX y detección de blancos. El grado de efectividad de la metodología aquí propuesta deberá ser definido a partir de la exploración de todas las subzonas delimitadas. De todas formas, si consideramos el universo del total de subzonas exploradas, nuestra tasa de acierto es del 70 %, lo cual resulta alentador considerando los recursos con los que se trabajó, así como también un acceso condicionado a la zona de estudio, dado por el carácter de zona militar restringida y por sus condiciones geomorfológicas.

CONCLUSIONES

Se logró demostrar que es posible detectar explosivos remanentes de guerra utilizando datos multiespectrales, permitiendo acotar las zonas de exploración para el despeje y disminuir los gastos asociados a ello.

Es necesario profundizar en un diagnóstico comparativo de todos los algoritmos utilizando todas las variables de calibración posibles a fin de conseguir la combinatoria de clasificación que ofrezca el mayor rendimiento. Si bien nuestra cadena de procesamiento espectral entregó óptimos resultados es prioritario averiguar si existen otras calibraciones que los mejoren. En segundo lugar, creemos que es necesario elaborar nuevas estrategias de análisis basadas en clasificaciones blandas de subpíxel, pues algunos estudios han develado su potencialidad, lo cual no alcanzamos a comprobar acá.

Se debe experimentar con la utilización de datos provenientes de otros sensores de alta resolución, como así también profundizar en el estudio por bandas individuales, analizando el comportamiento de las anomalías en cada una de ellas.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo y la colaboración del Profesor Carlos Eissmann, quien oriento el enfoque de esta investigación y cuyas gestiones posibilitaron su desarrollo. Asimismo doy las gracias a todos los docentes del programa de Geomática de la USACH. Agradecemos también apoyo de los oficiales de la Brigada de Operaciones Especiales quienes nos brindaron gentilmente su apoyo el día de nuestra investigación. Hacemos una mención de agradecimiento especial a la empresa AIRBUS Defense y Space, en específico a Alejandra González su representante para Latinoamérica, quienes aportaron la imagen Pléiades para poder desarrollar nuestro proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- Auborn, John E. y Fuller, Jr James. (1993). Target detection by co-occurrence matrix segmentation and its hardware implementation. *SPIE Digital Library* 32(11): 2698.
- Carr, I., Fletcher I., Holland P., Leonelli J., Mcpherrin D., y Althouse M. (1990). Characterization of filtered FLIR systems designed for chemical vapor detection and mapping. [en línea] *SPIE Digital Library*. Disponible en: <<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=944819>> [fecha de consulta: 20 febrero 2016]
- Chang, C., Chen, K., Wang, J. y Althouse, Mark L. G. (1994). A relative entropy-based approach to image thresholding. *Pattern Recognition Letters* 27(9): 1275-1289.
- Chiang, Shao-Shan. y Chang, Chein-I. (2001). Discrimination Measures for Target Classification. *Remote Sensing Signal and Image Processing Laboratory*.
- Guo, Q., Bing, Z., Ran, Q., Gao, L., Li, J. y Plaza, A. (2014). Weighted-RXD and Linear Filter-Based RXD: Improving Background Statistics Estimation for Anomaly Detection in Hyperspectral Imagery. *IEEE Journal of selected Topics in applied earth Observations and remote sensing* 7(6).
- Harsanyi, J.C. y Chang, C. (1994). Hyperspectral image classification and dimensionality reduction: an orthogonal subspace projection approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 32(4): 779-785.
- IMAS 5.10. Gestión de Información para Acción Contra Minas. [en línea]. Disponible en: <<http://www.mineactionstandards.org/fileadmin/MAS/documents/imas-nternational-standards/spanish/IMAS-05-10-Ed1-Amd1-sp.pdf>> [fecha de consulta: 27 septiembre 2015]
- Liao, W., Chen, D. y Baertlein, B.A. (2001). Detection and remediation technologies for mines and minelike targets, *Spie* no. VI, Orlando, USA.
- Manolakis, D., Marden, D. y Shaw, G. A. (2003). Procesamiento de imágenes hiperespectrales para aplicaciones de detección automática de objetivos, *Lincoln Laboratory Journal* 14: 79-116.
- Monitor. Monitoring progress in eliminating landmines, cluster munitions, and other explosive remnants of war. [en línea]. Disponible en: <<http://www.the-monitor.org/en-gb/home.aspx>> [fecha de consulta: 20 Abril 2015]
- Reed, I.S. y Yu, X. (1990). Adaptive multiple-band CFAR detection of an optical pattern with unknown spectral distribution. *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process* 38: 1760-1770.
- Rejas Ayuga, J., Martínez Marín, R., Bonatti, J., Martínez-Frías, J. y Marchamalo Sacristán, M. (2015). Detección de anomalías mediante espectrometría de imagen en la cordillera volcánica central de Costa Rica. Implicaciones en la exploración planetaria. *Rev. Ciencias Espaciales* 8(2): 272-286.
- Ren, H y Chang, C. (2000). Enfoque minimizado por interferencia con restricción de objetivo para la detección de objetivo de subpíxeles para imágenes hiperespectrales. *Optical Engineering* 39(12): 3138-3145.
- Sahoo, P.K, Soltani, S. y Wong, A. K. C. (1988). A survey of thresholding techniques. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 41(2): 233-260.
- Sanderson, H. (1995). Image segmentation for compression of images and image sequences. *IEE Proceedings - Vision, Image, and Signal Processing* 142(1): 15-21.
- Sanz, C. (2002). Un Método de Clasificación aplicado al Análisis de Imágenes Hiperespectrales. Tesis Doctoral Razonamiento Evidencial Dinámico. Universidad Nacional de la Plata, Facultad de Ciencias Exactas.
- Schaum, A. y Stocker, Alan (2004). *Advanced Algorithms for Autonomous Hyperspectral Change Detection*.
- Stein, D., Beaven, S., Hoff, L., Winter, E., Shaum, A. y Stocker, A. (2002). Anomaly Detection from hiperespectral Imagery. *EEE Signal Processing Magazine* 19: 58-69.
- Witherspoon, N. H., Holloway, J. H., Davis Kenn S., Miller, R. W. y Dubey, A. C. (1995). The Coastal Battlefield Reconnaissance and Analysis (COBRA) Program for Minefield Detection. *Spiel* 2496: 500-507
- Zhang, J., Chen C., Xiang Y., Zhou w. y Vasilakos, A. (2013). An Effective Network Traffic Classification Method with Unknown Flow Detection. *IEEE Transactions on Network and Service Management* 10(2): 133-147.
- Camacho, A., Vargas, C. y Argueyo, H. (2016). Un estudio comparativo de algoritmos de detección de objetivos en imágenes hiperespectrales aplicados a cultivos agrícolas en Colombia. *Tecnura* 49(20): 86-99.
- Guo, Q., Pu, R. , Cheng, J. (2016). Anomaly Detection from Hyperspectral Remote Sensing Imagery. *Geosciencias* 56 (6):
- Fahad, M. Hy, M., Zhang, Y. (2016). Combination of CEM & RXD for target detection in hyperspectral images. *Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS)*. 2016 8th

Sobre el autor

Gonzalo Escobar Arévalo

Licenciado en Historia, Magister en Geomática. Universidad de Santiago de Chile (USACH). Profesional Geoanalista en USACH asociado a proyectos de investigación Fondecyt de análisis de evolución urbana, minera e industrial.

Metodología para evaluar la susceptibilidad a los deslizamientos y la licuefacción de suelos, inducidos por terremotos para Cuba suroriental

REVISTA **MAPPING**
Vol. 29, 204, 14-23
2021
ISSN: 1131-9100

Methodology to evaluate the susceptibility to landslides and liquefaction of soils, induced by earthquakes for southeast Cuba

Sandra Y. Rosabal Domínguez¹, Alina Rodríguez Infante², José A. Zapata Balanqué³

Resumen

La región de Cuba suroriental es considerada como la zona de mayor peligro sísmico del país, debido a su cercanía a la zona de falla Bartlett-Caimán, por consiguiente una actividad sísmica de moderada a alta intensidad puede inducir peligros geológicos en esta región e impactar en el medio ambiente. El objetivo principal es proponer una metodología que permita evaluar la susceptibilidad a los deslizamientos y la licuefacción de suelos inducidos por terremotos para Cuba suroriental a través de la caracterización geológica, identificación de factores antropizados, caracterización morfotectónica y evaluación sismológicas. Se obtienen como resultados nuevos mapas de susceptibilidad a deslizamientos y licuefacción de suelos inducidos por terremotos; así como la comprobación directa en el terreno de los deslizamientos; se identifican las fallas principales que cortan el área de estudio, y se establecen y caracterizan los bloques morfotectónicos y el movimiento relativo entre ellos.

Abstract

The southeastern part of Cuba is considered to be the area of greatest seismic hazard in the country, due to its proximity to the Bartlett-Cayman fault zone, therefore a moderate to high intensity seismic activity can induce geological hazards in this region and impact the environment. The main objective is to propose a methodology that allows to evaluate the susceptibility to landslides and the liquefaction of soils induced by earthquakes for southeast Cuba through the geological characterization, identification of anthropized factors; morphotectonic characterization and seismological evaluation.

New maps of landslide susceptibility and liquefaction induced by earthquakes are obtained as results; as well as the direct verification in the terrain of landslides; the main faults that cut the study area are identified; and the morphotectonic blocks and the relative movement between them are established and characterized.

Palabras clave: deslizamientos, licuefacción de suelos, bloques morfotectónicos, metodología, peligros geológicos, medio ambiente.

Keywords: landslides, soil liquefaction, morphotectonic blocks, methodology, geological hazards, environment.

¹Investigador Auxiliar.

Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas

sandra@cenais.cu

²Investigador Titular.

Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMM)

alinarodriguezinfante@gmail.com

³Investigador Titular.

Delegación Provincial del CITMA, en Santiago de Cuba (CITMA)

zapata@citmasc.ciges.inf.cu

Recepción 13/01/2021

Aprobación 23/04/2021

1. INTRODUCCIÓN

La región de Cuba suroriental, es considerada la zona de mayor peligrosidad sísmica de Cuba, debido a la cercanía a la zona de contacto entre las placas de Norteamérica y el Caribe, contacto conocido como zona de falla Bartlett-Caimán, por consiguiente las máximas intensidades sísmica se esperan en este territorio, donde pueden ocurrir peligros geológicos inducidos como los deslizamientos y la licuefacción de suelos.

Cuba suroriental se ubica al sur del extremo este de Cuba, entre los 74,133° y 77,752° de longitud oeste y los 19,831° a 20,317° de latitud norte (figura 1). Abarca parte de la zona emergida de Cuba Oriental y cubre un área aproximada de 11 632,2 km². Dentro de sus límites geográficos se encuentran la parte sur de las provincias de Santiago de Cuba, Guantánamo y Granma.

El estudio bibliográfico mostro que a nivel internacional existen diversas metodologías para evaluar el potencial de licuefacción, tales como Seed and Idriss, 1971; Seed et al., 1983; Seed et al., 1985; Tokimatsu and Yoshimi, 1983; Seed and De Alba, 1986; Ishihara, 1985; Shibata and Teparaksa, 1988 (citados por TC4, 1999); así como los diferentes métodos desarrollados en el manual de zonación sísmica japonés, conocido como TC4 (1999), en función de los grados o nivel de estudio y la escala correspondiente.

En los últimos años estas metodologías fueron implementadas en Cuba de forma integral, parcial o combinada; esto se puede notar en los trabajos de Ordaz et al., 2013; Fernández, 2000; Márquez et al., 2002; García et al., 2002; Heredia y Calderín, 2004; Zapata et al., 2013; Chuy et al., 2015b; Fernández et al., 2016; Fernández et al., 2017. Pero existen reportes históricos de licuefacción en otras áreas de Cuba oriental que necesitan ser estudiadas.

Por otra parte, para los deslizamientos existen diferentes formas de realizar el cartografiado de la susceptibilidad a través de métodos estadísticos, heurísticos

y determinísticos (Van Westen et al., 1999; Guzzetti et al., 1999).

Las metodologías mencionadas con anterioridad, así como otras empleadas en Cuba (colectivo de autores, 2011; Castellanos, 2008; Villalón et al., 2012; Savón et al., 2017) tienen como deficiencia la falta de integración en los análisis de deslizamientos y licuefacción inducidos por terremotos ya que para los deslizamientos no integran los aspectos ingeniero-geológicos y no aplican los métodos morfométricos, el análisis sismológico y la tectónica activa. Los criterios referidos con anterioridad hacen necesario la introducción de estos métodos.

2. MATERIAL Y MÉTODO

Para la evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos y licuefacción de suelos inducidos por terremotos, se debe realizar la caracterización geológica; identificación de **factores antrópicos**; caracterización morfotectónica y evaluación sismológicas, todos estos aspectos influyen en la ocurrencia de los principales peligros geológicos inducidos. A continuación, se realiza la descripción de cada una de estos pasos.

Caracterización geológica

Se realiza la **caracterización** geológica del territorio a partir del mapa geológico digital de Cuba Oriental a escala 1:100 000 (IGP, 2003), el léxico estratigráfico (Colectivo autores, 2013) y los aspectos ingeniero-geológicos de las formaciones presentes (Pérez, 1976), como la alternancia de rocas duras y débiles, el intemperismo, tectonismo, carso, estratificación, entre otros aspectos. Como resultado se obtienen las formaciones geológicas de mayor susceptibilidad a deslizamientos y licuefacción de suelos.

Factores antrópicos

Se identifican los elementos antropizados del terri-



Figura 1. Ubicación geográfica de Cuba suroriental (rectángulo rojo), con las ciudades Santiago de Cuba y Guantánamo como cabeceras de provincias. Fuente: Autores.

torio que conducen a la ocurrencia de deslizamientos y licuefacción de suelos; lo cual permite obtener la **caracterización** de los **factores antrópicos**.

Caracterización morfotectónica

La caracterización morfotectónica incluye la definición de estructuras tectónicas, el análisis geomorfológico y la reevaluación de estructuras regionales o límites de bloques morfotectónicos. A continuación, se describen cada una de estas tareas.

Definición de estructuras tectónicas

Las estructuras tectónicas se definen al aplicar los métodos morfométricos, (tabla 1). Como resultado se obtienen los esquemas homólogos a través de herramientas SIG. Luego se identifican los alineamientos y se confecciona el mapa de superposición gráfica de los mismos; finalmente, con la aplicación de criterios de identificación se obtienen las estructuras, su caracterización y esquema tectónico.

Realización del análisis geomorfológico

Para el análisis geomorfológico se emplea la clasificación morfológica del relieve (Moreno et al., 2017), y se obtienen las categorías de montañas, alturas y llanuras, así como las subcategorías asociadas. Así como los criterios de identificación del fallamiento activo.

Reevaluación de estructuras tectónicas regionales o límites de bloques morfotectónicos

Se realiza la reevaluación de estructuras tectónicas regionales o límites de bloques morfotectónicos a través del método de Haller et al., 1993 que clasifica las fallas como: simple falla, definida por una edad única de ruptura; con secciones, que puede o no ser de una edad o estilo estructural simple; segmentada, presenta segmentos estructurales con comportamiento sísmico propio o que actúan independientemente uno de otro. Como resultado se obtiene el fallamiento activo.

Evaluación sismológica

La evaluación sismológica incluye varias tareas como, ejecución de análisis de los catálogos del Servicio Sismológico Nacional; realización de análisis de la información macrosísmica existente; obtención de las máximas aceleraciones esperadas; aplicación del Criterio Magnitud-Distancia. A continuación, se describen cada una de estas tareas:

Ejecución de análisis de los catálogos del Servicio Sismológico Nacional (SSN)

Se analiza el catálogo de terremotos y se consideran

los eventos con magnitud mayor o igual a 4,0 Richter; a partir de esta magnitud se generan los deslizamientos (Keefer, 1984). Se obtienen los niveles de actividad sísmica, epicentros reportados, y principales zonas sismogeneradoras que afectan la región, así como los criterios de fallamiento activo.

Realización de análisis de la información macrosísmica existente

Se analiza la información macrosísmica y se valoran los reportes históricos de peligros geológicos inducidos por sismos. Estas zonas constituyen áreas de peligro porque bajo condiciones similares puede repetirse el fenómeno (TC4, 1999). También se obtiene la cantidad de terremotos fuertes ocurridos en la región.

Obtención de las máximas aceleraciones esperadas

Al emplear los resultados precedentes de Chuy y Álvarez, 1995; y la NC:46-1999 (Cuba. Oficina Nacional de Normalización, 1999), se determina la zona sísmica donde se ubica el área de estudio, y se obtienen los valores de la aceleración horizontal máxima del terreno e intensidad sísmica. Según Seed et al., 1985 citado por TC4 (1999), las intensidades entre VII-IX MSK y la aceleración en el rango de 0,10g – 0,40g influyen en la ocurrencia de la licuefacción.

Aplicación del Criterio Magnitud-Distancia

Este criterio establece que la proporción de fallo de taludes disminuye proporcionalmente con el aumento de la distancia de la fuente sísmica (TC4, 1999). Se obtiene la máxima distancia epicentral (figura 2) de fallo destructivo de taludes (Clase 1) y la máxima distancia epicentral de fallo de taludes (Clase 2), y se considera a Cuba como un país húmedo y los terremotos históricos con peligros geológicos asociados.

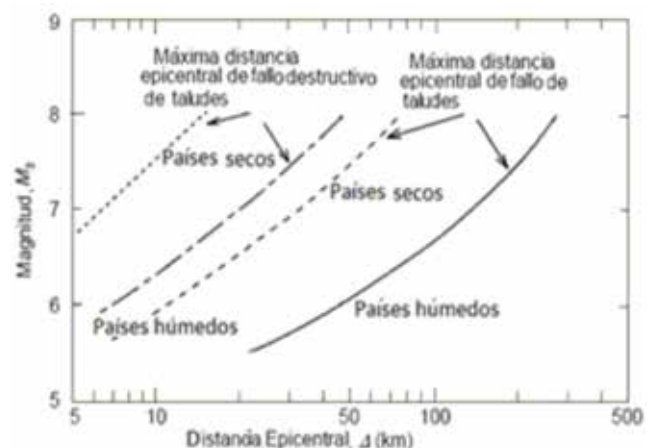


Figura 2. Relación general entre la magnitud y la distancia epicentral de fallo de taludes. Fuente TC4, (1999).

Tabla 1. Métodos morfométricos aplicados

Métodos morfométricos	Fórmulas asociadas o aplicación del método	Métodos morfométricos
Trazado de la red fluvial	Para su confección se parte del sistema de ríos y tributarios, representados en el mapa topográfico, tanto sus cauces permanentes como temporales; después se procede al trazado de todas las cárcavas y afluentes, que quedan inferidos por las curvas de nivel hasta llegar a los extremos más elevados de la red fluvial, tanto en su cabecera como en los márgenes de la cuenca (Rodríguez, 2000).	Metal 1 (Vehículo Militar)
Jerarquización de la red del drenaje	Para su elaboración los distintos cursos de agua que integran la red de drenaje superficial se subdividen en segmentos de cauce, clasificados en función del orden de magnitud de los mismos, según el método de Horton (1945).	Metal 2 (garita)
Densidad de drenaje	según Horton, 1945 se define como el cociente entre la longitud total de los cauces que conforman el sistema fluvial de la cuenca y el área total de la cuenca. Dada por la ecuación 1: $D = Lt/A \quad (1)$ <p>Donde Lt, es longitud total de todos los canales de agua en km; A, es el área en km²</p>	Metal 1 (Vehículo Militar)
Nivel base de erosión	Estos mapas marcarán los niveles de base de erosión de los ríos de un determinado orden, el cual está dado por el tiempo de su formación. Se denominan de primer orden los ríos más jóvenes o de última formación, sucesivamente serán más viejos a medida que el orden sea mayor. Después de confeccionado el mapa de órdenes, se superpone el mismo al mapa topográfico; posteriormente, se buscan los puntos de intersección de los ríos de un orden determinado con las curvas de nivel y se ponen en esos puntos los valores de la cota topográfica. Después de marcados todos los puntos, se unen con líneas rectas o curvas los puntos de igual valor (Rodríguez, 2000).	Metal 2 (garita)
Pendientes	Consiste en la representación areal de la variación de los valores de pendiente de un sector de la superficie. Para la confección del mapa se parte del criterio de que áreas con separación similar de las curvas de nivel presentan iguales valores de inclinación; por lo cual la primera tarea consiste en separar los sectores del mapa con comportamiento similar de estas curvas, determinando para cada sector los valores de pendiente que le corresponden en dependencia del espaciamiento entre curvas. Según Rodríguez (2000) se determina a través de la ecuación 2: $\text{Tan} \alpha = \Delta h/e \quad (2)$ <p>Donde α es el ángulo de pendiente; Δh es el desnivel o separación vertical entre curvas; e es el espaciamiento horizontal entre curvas.</p>	Metal 1 (Vehículo Militar)
Diseción vertical	Es un parámetro morfométrico que representa la amplitud del relieve (altura relativa) por unidad de área y se expresa en m/km ² (Mora & Vahrson, 1993; Priego et al., 2008). Sirve principalmente para definir algunos tipos de relieve (montañas, planicies acolinadas, etc.) y ofrece datos sobre la energía del relieve. Se determina a través de la ecuación 3: $Dv = H_{\text{max}} - H_{\text{min}}/A \quad (3)$ <p>Donde Dv, es la diseción vertical; H_{máx} es la altura máxima en metros; H_{mín} es la altura mínima en metros; A, es el área en kilómetros cuadrados (km²).</p>	Metal 2 (garita)

Luego de obtener la caracterización geológica, antrópica, morfotectónica y la evaluación sismológica del territorio, se evalúan la licuefacción de suelos y los deslizamientos inducidos por terremotos, como se describe a continuación:

2.2. Evaluación de la susceptibilidad a la licuefacción de suelos inducida por terremotos

Para la evaluación de la susceptibilidad a la licuefacción de suelos se emplean los criterios geológico-geomorfológico y si/no se caracterizan los suelos a licuar.

Criterio geológico-geomorfológico

Para evaluar la licuefacción se emplea el criterio geológico-geomorfológico que depende de la información existente y se seleccionan las unidades geomorfológicas (tabla 2) y geológicas susceptibles en función de su edad (tabla 3). Asimismo, se determinan las condiciones geomorfológicas específicas (tabla 4) para la ocurrencia de este peligro (TC4, 1999). Se valoran los suelos susceptibles y en el caso de los sedimentos aluviales se valora su granulometría (Peñalver et al., 2008) y perfil de suelo (NC:46-99).

Tabla 2. Susceptibilidad de unidades geomorfológicas a la licuefacción, Grado I. Fuente: Iwasaki et al., 1982 (citados por TC4, 1999)

Categoría	Topografía	Potencial de licuefacción
A	Actual cauce del río, viejo cauce del río, pantano, tierras reclamadas, tierras bajas.	Probable licuefacción
B	Abanico, arenas de dunas, llanura de inundación, playas y otras llanuras.	Posible licuefacción
C	Terrazas marinas, colinas y montañas.	No probable licuefacción

Tabla 3. Unidades geológicas (resumidas) susceptibles a la licuefacción durante una fuerte sacudida. Fuente: Youd and Perkins, 1978 (citados por TC4, 1999).

Tipos de depósitos	Probabilidad de que los sedimentos cohesivos, saturados, sean susceptibles a la licuefacción por la edad del depósito			
	< 500 años	Holoceno	Pleistoceno	Prepleistoceno
Canal del río	Muy alta	Alta	Baja	Muy baja
Llanura de inundación	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
Abanico y llanura aluvial	-----	Baja	Muy baja	Muy baja
Terrazas marinas	Moderada	Baja	Baja	Muy baja
Coluviales	Alta	Moderada	Baja	Muy baja

Tabla 4. Susceptibilidad de unidades geomorfológicas a la licuefacción sometidas a una sacudida de VIII grados M.M (Merali Modificada). Fuente: Wakamatsu, 1992 (citado por TC4, 1999).

Condiciones geomorfológicas		Potencial de licuefacción
Clasificación	Condiciones específicas	No probable
Llanura del valle	Llanura del valle que contiene grava o adoquines	Posible
	Llanura del valle que contiene suelos arenosos	Posible
Pantano y ciénagas	-----	Probable
Canal de río abandonado	-----	Probable
Antiguo estanque	-----	No Probable
Canal de río seco	Canal de río seco que contiene grava o adoquines	Probable
	Canal de río seco que contiene suelos arenosos	Muy baja

Se consideraron, además, la intensidad sísmica; la aceleración horizontal según ubicación del área de estudio y NC46:1999 (para las zonas 2A con 0,15 g, 2B con 0,20 g y 3 con 0,30 g); la topografía (TC4, 1999); así como la profundidad de los niveles freáticos según González de Vallejo et al., 2002.

El método aplicado pertenece al Nivel o Grado I de zonación sísmica (TC4, 1999) debido a la carencia de información ingeniero-geológica (límite líquido, índice de plasticidad, profundidad del nivel freático) en las

calas reanalizadas (Méndez et al., 2003) para el sector Santiago de Cuba en Cuba suroriental; así como la falta de información requerida sobre los mapas de suelos cuaternarios a escala 1:250 000 (IGP, 2008) y la existencia de información a escalas pequeñas.

Criterio si/no se caracterizan los suelos a licuar

Otra forma para evaluar la licuefacción de suelos es a través del criterio si/no se caracterizan los suelos a licuar, según Pierre-Yves (2005), son susceptibles a licuar.

Cieno y arenas que presenten las siguientes características:

Grado de saturación al 100 %; granulometría uniforme con tamaño del grano al 50 %, (D_{50}), en el intervalo de 0,05 mm y 1,5 mm.

Arcillas que presenten las siguientes características:

Tamaño del grano al 15 %, (D_{15}) mayor que 0,005 mm; límite líquido menor que 35 %; contenido de agua mayor que $0,90W_L$; índice de plasticidad menor que 0,73 ($W_L - 20$).

No son susceptibles a licuar en ningún caso:

Gravas con D_{10} mayor que 2 mm.

Arcillas que presenten las siguientes características:

Tamaño del grano al 70 %, (D_{70}) menor que 74 μ m; índice de plasticidad mayor que 10 %.

Para la aplicación de este criterio se consultaron la base de calas disponible (Méndez et al., 2003). Como resultado se obtienen los suelos susceptibles a la licuefacción.

2.3 Evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos inducidos por terremotos

En la evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos se emplea el método de la zonación pasiva que se obtiene combinando las variables condicionantes, ya que los deslizamientos ocurren cuando en una ladera, con determinadas litologías, con cierto grado de humedad y pendiente específicas, se alcanza un grado de susceptibilidad. Esos elementos son los denominados elementos pasivos (Mora et al., 1992).

En correspondencia con estos criterios, se realizaron las siguientes modificaciones: en la susceptibilidad litológica se incluyen los aspectos ingeniero-geológicos y las características de los grupos litoestructurales (Nicholson y Hencher, 1997). Además, se sustituye la susceptibilidad por humedad de suelo por la densidad de la red hidrográfica, según los criterios de Aristizábal y Yokota, 2006; Flores y Hernández, 2012; Vargas, 2002 y Castellanos, 2008. En la figura 3 se muestran las variables condicionantes que conforman la zonación pasiva.

Geomorfología. Se consideran las zonas rocosas o acantilados de fuertes pendientes según los criterios de la Agencia Suiza para la Cooperación y el Desarrollo/Apoyo Local para el Análisis y Manejo de los Riesgos Naturales (COSUDE/ALARN, 2006). Igualmente, se consideran la topografía y la forma del relieve (Galbán et al., 2012; Galbán, 2014). Los valores de las pendientes se generan a partir del MDT para obtener la susceptibilidad geomorfológica.

Geología y Geotecnia. Se valoran los afloramientos rocosos fuertemente fracturados (COSUDE/ALARN, 2006; Flores, 2003); rocas alteradas, intemperizadas; presencia de estratificación, carsificación, agrietamiento, tectonismo y plegamientos (Pérez, 1976); información geológica (IGP, 2003; Colectivo de autores, 2013) y elementos litológicos (alternancia de estratos de diferente naturaleza). Además, se clasifican las rocas, duras, duras a semiduras, friables incoherentes y blandas coherentes (Lomtadze, 1977 y Abramson, 1996) y sus propiedades físico-mecánicas; los grupos litoestructurales y su susceptibilidad.

Hidrología. La red del drenaje, los efectos del agua

Tabla 5. Propuesta de clasificación de la zonación pasiva.

Clasificación	Pendientes	S. litológica	Relieve	Relieve	Resultados a esperar
Alta	Mayores de 45° y de 35°-45°	Alta	Montañas con elevaciones de más 500 m y entre 200 y 500 m sobre nivel medio del mar	Muy densa y densa	Caidas desprendimientos desplomes, volcamientos, deslizamientos
Moderada	25° -35°	Moderada	Zonas elevadas entre 50 y 200 m de altura	Moderadamente densa	Deslizamientos
Baja	15° -25°	Baja	Zonas bajas, llanuras o elevaciones bajas de hasta 50 m de altura	Baja densidad	Baja ocurrencia de deslizamientos
Muy baja	0° -15°	Baja	Zonas bajas	Baja densidad	No ocurren deslizamientos

Nota: En la tabla 5., S. litológica representa la susceptibilidad litológica.

en el terreno, los arrastres, la erosión de los materiales que integran el talud o la ladera, la circulación subsuperficial de agua, los cambios en el nivel de base en la escorrentía y las variaciones del nivel freático, entre otros elementos (González de Vallejo et al., 2002). Igualmente, la densidad de la red y los primeros órdenes de los ríos que indican áreas de erosión.

Se resalta la aplicación de métodos y técnicas experimentales (laboratorio y campo) en el área de investigación. Como parte de este proceso se crea el inventario de deslizamientos (Villalón et al., 2012; Rosabal et al., 2009; Rosabal, 2012 y 2013) relacionado con las intensas lluvias, debido a que no existe un inventario de deslizamientos por sismos para Cuba.

Apoyados en herramienta del SIG, se digitalizan y confeccionan los mapas que dependen del MDT, se georreferencia la información y se realiza la generalización cartográfica de los mapas bajo análisis. Cada variable condicionante es tratada individualmente en el SIG mediante clasificaciones, creándose 4 clases para generar los mapas que expresan su aporte a la susceptibilidad. Se consideraron los criterios de evaluación del peligro por derrumbe (COSUDE/ALARN, 2006). Como resultado se obtiene el mapa de susceptibilidad a los deslizamientos con cuatro niveles de susceptibilidad, como se muestra en la tabla 5. El mapa obtenido necesita ser validado, para ello se realiza la comprobación directa.

Comprobación directa

La comprobación directa en el terreno permite verificar en el campo el comportamiento del modelo obtenido y prever deslizamientos futuros. Se emplean además los inventarios y resultados de investigaciones precedentes. Se obtiene la documentación de deslizamientos, caídas y desprendimientos de rocas.

Al culminar el último paso de la metodología se obtiene la zonación de la susceptibilidad a la licuefacción de suelos y a los deslizamientos inducidos por actividad sísmica, que contará con las máximas distancias epicentrales de fallo destructivos de taludes y fallo de taludes; lo cual permitirá una mejor estimación de la peligrosidad a los deslizamientos y a la licuefacción. Este resultado es una herramienta muy útil para la toma de decisiones, principalmente en la primera etapa de planificación de un proyecto constructivo.

En la figura 3, 3a y 3b, se muestra el diseño del flujograma que contiene la aplicación de los métodos empleados para la evaluación de la susceptibilidad a los peligros de deslizamientos y licuefacción de suelos, inducidos por terremotos.

3. RESULTADOS

*Ver en la página siguiente (Pág. 20).

4. CONCLUSIONES

La metodología que agrupa los métodos morfométricos, conjuntamente con la evaluación sísmológica y la tectónica activa, permite la caracterización y cartografiado del fallamiento activo; la caracterización morfotectónica a escala detallada y aporta criterios válidos para la zonación de la susceptibilidad a los deslizamientos y licuefacción de suelos inducidos por la actividad sísmica, así como la comprobación directa en el terreno de los deslizamientos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Centro Nacional de Investigaciones Sísmológicas (CENAI) y al Dr. Tomás Jacinto Chuy Rodríguez, por su ayuda incondicional.

REFERENCIAS

- Abramson, L. (1996). Slope stability and stabilization methods. *Engineering geology Principles*. Wiley Interscience. pp. 60-106.
- Agencia Suiza para la Cooperación y el Desarrollo/ Apoyo Local para el Análisis y Manejo de los Riesgos Naturales (COSUDE/ALARN). (2006). *Proyecto ALARN. Instrumentos de apoyo para el análisis y la gestión de riesgos naturales. Guía para el especialista*. Recuperado de <http://cidbimena.desastres.hn/docum/crid/Abril2006/CD1/pdf/spa/doc14894/doc14894-2c3.pdf>
- Aristizábal, E. y Yokota, Sh. (2006). Geomorfología aplicada a la ocurrencia de deslizamientos en el valle de Aburra. *Dyna Rev. Fac. Nac. Minas*, 73(149).
- Castellanos, E. (2008). *Evaluación multiescala de riesgo por deslizamientos de terreno en Cuba* (Tesis doctoral). International Institute for Geo-information Science and Earth Observation. Enschede, The Netherlands.
- Colectivo de autores. (2011). *Estudios de peligros, vulnerabilidad y riesgos de deslizamientos de tierra* [Informe final]. Holguín.
- Colectivo de autores. (2013). *Léxico Estratigráfico de Cuba*. La Habana. Instituto de Geología y Paleontología. Servicio Geológico de Cuba. Ministerio de Energía y Minas.

* RESULTADOS



Figura 3. Flujograma general de la aplicación de métodos integrados para la evaluación de deslizamientos y licuefacción de suelos, inducidos por la actividad sísmica. Fuente: Autora.

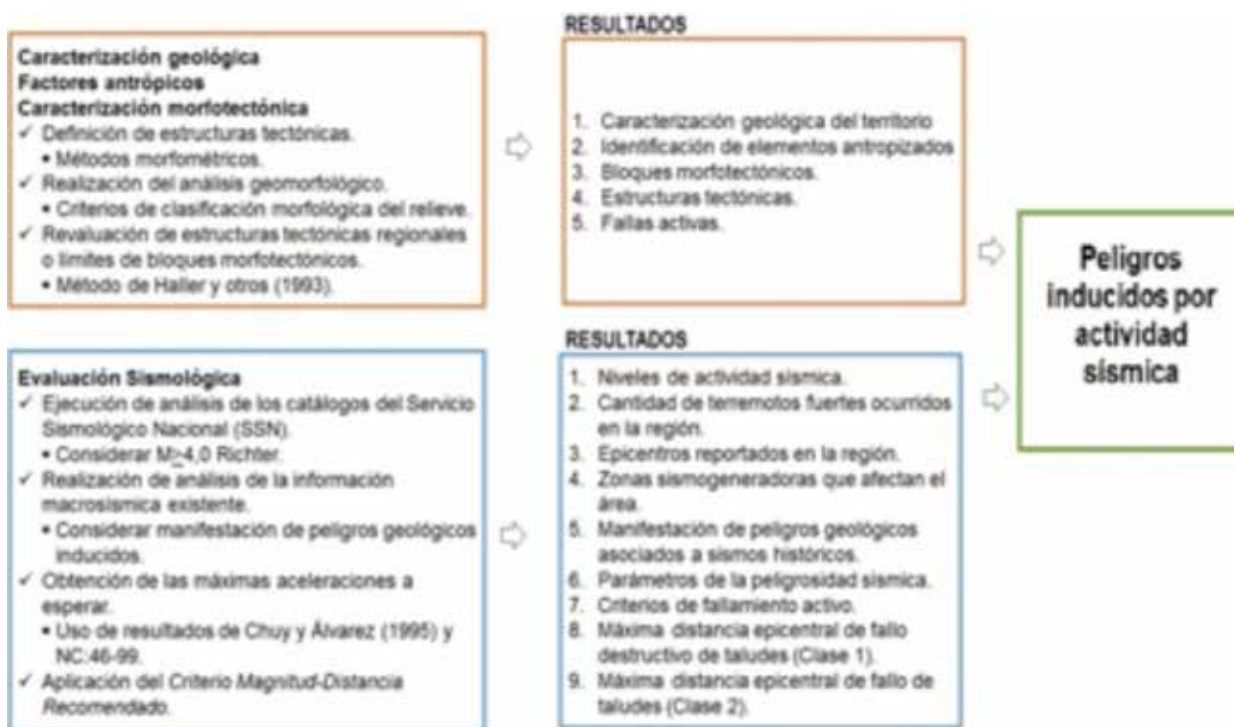


Figura 3a. Representación esquemática detallada del flujograma que muestra la aplicación de métodos integrados para la evaluación de deslizamientos y licuefacción de suelos, inducidos por la actividad sísmica. Fuente: Autora.

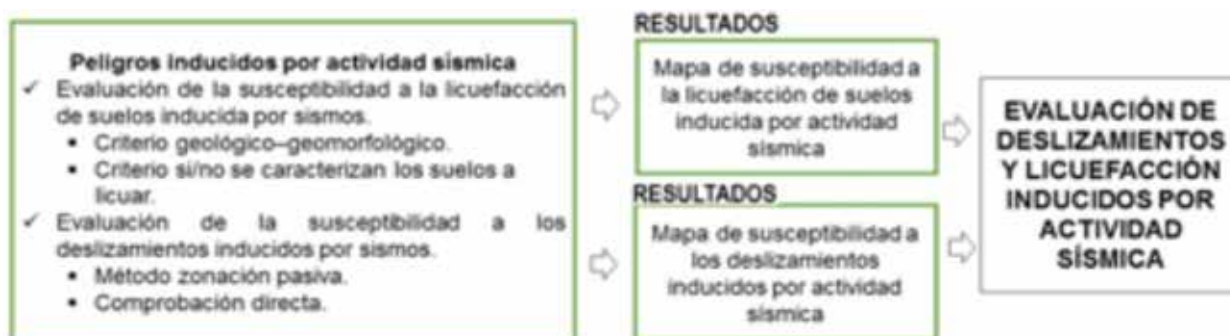


Figura 3b. Representación esquemática del flujograma en detalle. Fuente: Autora.

Chuy, T. y Álvarez, J. (1995). *Peligrosidad sísmica de Cuba con fines de la Norma Sismorresistente Cubana* [Reporte de Investigación]. [Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais)]. Santiago de Cuba.

Chuy, T., Rosabal, S., Caballero, F. y Oñate, R. (2015b). *Evaluación de la sismicidad y peligro sísmico para la inversión Terminal Multipropósito del Puerto de Santiago de Cuba*. [Fondos del Centro Nacional de

- Investigaciones Sismológicas (Cenais) y Puerto Guillerme Moncada]. Santiago de Cuba
- Cuba. Oficina Nacional de Normalización (1999). *Norma Cubana NC 46:1999: Construcciones Sismorresistentes. Requisitos Básicos para el Diseño y Construcción*. La Habana.
- Fernández, B. (2000). *Posibilidad de ocurrencia del fenómeno de licuefacción en la cuenca de Santiago de Cuba catalizado por terremotos fuertes* (Tesis de Maestría). Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Holguín, Cuba.
- Fernández, L., Guardado, R., Herrera, I., Oliva, R. y Díaz, P. (2016). Escenarios susceptibles a licuefacción inducida por sismos de gran magnitud en Santiago de Cuba. *Revista Minería y Geología*, 32(2), 53-69.
- Fernández, L., Bandera, I., Guardado, R. y Oliva, R. (2017). Susceptibilidad a la licuefacción de los suelos en la ciudad de Caimanera, Guantánamo. *Revista Minería y Geología*, 33(1), 26-43.
- Flores, M. (2003). *Movimientos en masa: identificación, causas y alternativas de manejo en Medellín*. Medellín: Editorial Alcaldía.
- Flores, M. y Hernández, J. (2012). Procesos de remoción en masa inducidos por el terremoto del 27 F de 2010 en la franja costera de la Región del Biobío, Chile. *Revista Geografía Norte Grande*, 53, 57-74.
- Galbán, L., Chuy, T. y Vidaud, I. (2012). *Indicadores más comunes en la evaluación de riesgos geológicos. Indicadores cualitativos y cuantitativos para la evaluación de peligro, vulnerabilidad y riesgos geológicos*. España: Editorial Académica Española.
- Galbán, L. (2014). *Procedimiento para la gestión y reducción de riesgos geológicos en la provincia Santiago de Cuba* (Tesis doctoral). Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Holguín, Cuba.
- García, J., Zapata, J. A., Arango, E. D., Monnar, O., Chuy, T. J., Fernández, B. C., Reyes, C. R., Oliva, R. (2002). Manejo y evaluación del riesgo sísmico en la ciudad de Santiago de Cuba, a partir de su implementación en un Sistema de Información Geográfica (SIG). *Nuevas Investigaciones Sismológicas en Cuba*. La Habana, Cuba. Editorial Academia. pp 73 – 82
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Prentice Hall.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. & Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31(1-4), 181-216.
- Haller, K., Machette, M. & Dart, R. (1993). *Guidelines for US database and map for the maps of the major active faults, Western Hemisphere, International Lithosphere Program (ILP), Project II-2*. Denver, Colorado, USA: US Department of Interior, US Geological Survey.
- Heredia, N. y Calderín, F. (2004). El Fenómeno de Licuefacción en suelos de la ciudad de Santiago de Cuba. En *Memorias de I Conferencia Internacional Peligrosidad, Riesgo Geológico e Ingeniería Sísmica SISMOS 2004*. Santiago de Cuba: Editorial Oriente.
- Horton, R. E. (1945). Erosional Development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56, 275-276.
- Instituto de Geología y Paleontología (IGP). (2003). *Mapa Geológico Digital de la República de Cuba a escala 1:100 000*. La Habana: Instituto de Geología y Paleontología.
- Instituto de Geología y Paleontología (IGP). (2008). *Mapa geológico digital del Cuaternario a escala 1:250 000*. La Habana: Instituto de Geología y Paleontología, Ministerio de la Industria Básica (Minbas).
- Keefer, D. (1984). Landslides caused by earthquakes. *Geological Survey of America Bulletin*, 95, 406-421.
- Lomtadze, V. (1977). *Geología aplicada a la ingeniería geodinámica aplicada a la ingeniería*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación.
- Márquez, I., Seisdedos, J., Chuy, T. y Díaz, R. (2002). *Valoración de las amenazas naturales y problemas estructurales que presentan dos instalaciones de la empresa Retomed en la ciudad de Santiago de Cuba*. [Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais)] Santiago de Cuba.
- Méndez, I., Aguller, M., Guevara, T., Rodríguez, M., Ramírez, M., Llull, E. y Recousó, Y. (2003). *Confeción base de datos de pozos de perforación de Cuba Oriental* [Informe]. Santiago de Cuba: Ministerio de la Industria Básica, Empresa Geominera Oriente.
- Mora, R., Vahrson, W. y Mora, S. (1992). *Mapa de amenaza de deslizamientos, Valle Central, Costa Rica*. Centro de Coordinación para la Prevención de Desastres Naturales en América Central. *Centro de Coordinación para la prevención de desastres naturales en América Central*. (CEPREDENAC).
- Mora, S. & Vahrson, W. (1993). *Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination*, Bull. Intl. Ass. Eng. Geology.
- Moreno, Y., Labrada, A., Rodríguez, A., Figueroa, Y. (2017). Metodología para la confección del mapa geomorfológico de la república de Cuba a escala 1:100 000. Guía para su elaboración. (Geocuba, ISMM, IGP).
- Nicholson, D. T. & Hencher, S. (1997). Assessing the potential for deterioration of engineered rock slopes. In *Proceeding International Symposium on Engineering Geology and the environment* (pp. 911-917). Athens.

- Ordaz, A., Hernández, J., Chuy, T. y García, J. (2013). La susceptibilidad a la licuefacción en el emplazamiento de la ciudad de San Cristóbal, Cuba Occidental. *Minería & Geología, Revista de Ciencias de la Tierra*, 29(2), 1-15.
- Peñalver, L., Cabrera, M., Delgado, R., Rodríguez, L., Pantaleón, G., Ugalde, C., Pérez, C. y Denis, R. (2008). *Mapa Digital de los Depósitos Cuaternarios del Archipiélago Cubano a escala 1:250 000*. La Habana: Instituto de Geología y Paleontología.
- Pérez, N. (1976). Aspectos ingeniero-geológicos de Cuba Oriental. En texto explicativo del mapa geológico de la provincia de Oriente....(Manuscrito). La Habana. Archivo del. Instituto de. Geología y. Paleontología. Academia de Ciencias de Cuba.
- Pierre-Yves, Bard. (2005). *Local effects on strong ground motion: physical basis and estimation methods in view of microzoning studies. Seismology, Seismic data analysis, hazard assessment and risk mitigation International Training Course*. Postdam, Germany.
- Priego, A., Bocco, G., Mendoza, M. y Garrido, A. (2008). *Propuesta para la generalización semiautomatizada de unidades de paisajes. Fundamentos y Métodos*. México, D.F: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rodríguez, A. (2000). *Geomorfología*. Moa, Holguín, Cuba: Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- Rosabal, S., Zapata, J. y Gómez, J. (2009). Incidencia de la geomorfología en los deslizamientos de la carretera de Beltrán, Guantánamo, Cuba. *Revista GEOS. Unión Geofísica Mexicana*, 29(2), 1-12.
- Rosabal, S. (2012). Peligro geológico por deslizamientos en sectores de la Provincia de Santiago de Cuba. En *Memorias de V Taller internacional de ingeniería y arquitectura para la reducción de desastres (CIIARD). 16 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura*. La Habana.
- Rosabal, S. (2013). Peligro geológico por deslizamientos en sectores de la provincia de Santiago de Cuba. En *Memorias de IV Simposio de riesgos geológicos y sismicidad. X Congreso Cubano de Geología (Geología 2013)*. La Habana, Cuba.
- Savón, Y., Mesa, A., Matos, L., Castillo, L., Odilio, M. y Delgado, R. (2017). Las precipitaciones como elemento disparador de movimientos gravitacionales en la provincia Guantánamo. En *Memorias de XII Congreso de Geología. VI Simposio de riesgos geológicos, procesos costeros. VII Convención de Ciencias de la Tierra*. La Habana, Cuba.
- Technical committee for earthquake geotechnical engineering (TC4) of the International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). (1999). *Manual for zonation on seismic geotechnical hazards*. Tokyo, Japan: The Japanese Geotechnical Society.
- Van Westen, C, Seijmonsbergen, A. & Mantovani, F. (1999). Comparing landslide hazard mapping. *Natural Hazards*, 20(2-3), 137-158.
- Vargas, R. (2002). Evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos municipio de La Celia. Departamento de Risaralda. Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER). Pereira, *Risaralda-CARDER-Feb. 2002*
- Villalón, M., Reyes, C., Aguller, C., Trejo, R., Nápoles, S., Despaigne, G.,... Suarez, O. (2012). *Informe sobre los estudios de PVR deslizamientos provincia Santiago de Cuba*. [Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais)]. Santiago de Cuba, Cuba.
- Zapata, J., Rosabal, S. y Cutie, M. (2013). *Investigaciones sismológicas para proyecto de estabilidad de taludes de la presa de cola de la empresa de níquel Ernesto Che Guevara en Moa, Holguín*. [Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (Cenais)]. Santiago de Cuba.

Sobre los autores

Sandra Yanetsy Rosabal Domínguez

Ingeniera Geóloga, Máster en Manejo Integrado de Zonas Costeras (MIZC) y Doctora en Ciencias Geológicas. Autora de varias publicaciones en revistas y eventos internacionales. Se desempeña como Investigadora Auxiliar en el Grupo de Peligro Sísmico del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas. Cuba.

Alina Rodríguez Infante

Ingeniera Geóloga y Doctora en Ciencias Geológicas. Autora de varias publicaciones en revistas y eventos internacionales. Se desempeña como Investigadora Titular en el Departamento de Geología del Instituto Minero Metalúrgico de Moa. Cuba.

José A. Zapata Balanqué

Ingeniero Geofísico y Doctora en Ciencias Técnicas. Autor de varias publicaciones en revistas y eventos internacionales. Se desempeña como Investigador Titular en Delegación Provincial del CITMA, en Santiago de Cuba (CITMA). Cuba.

La división político-administrativa en Cuba; antecedentes y actualidad

REVISTA **MAPPING**
Vol. 29, 204, 24-29
2021
ISSN: 1131-9100

The political administrative division in Cuba; background and current

Dr. C. Elier Méndez Delgado, Ms C. María del Carmen Lloret Feijóo

Resumen

En este trabajo se explican las diferentes divisiones territoriales por las que ha atravesado la Isla de Cuba desde su origen hasta nuestros días. En Cuba se aprecian cambios regionales significativos en el transcurso de los últimos cuatro siglos y desde el año 1600 se comenzaron a realizar estudios dirigidos a conformar la División Político-administrativa; después de varios años, ya desde el 8 de octubre de 1607 la Isla quedó dividida en «dos mitades» con gobiernos independientes uno del otro: La Habana y Santiago de Cuba, reservándose al gobernador de La Habana el título de Capitán General. Hasta entonces la Isla de Cuba fue considerada como una sola provincia; esta disposición se recoge en la historia de Cuba, como la primera segmentación territorial emprendida por la metrópolis, pero no fue ejecutada hasta 1774, a consecuencia de un crecimiento demográfico, con una población de aproximadamente 171 620 habitantes, y un desarrollo económico considerable, basado en la economía de plantación y el despegue de la industria azucarera. En la actualidad, después de 7 Divisiones Políticas-administrativas, la Isla de Cuba tiene 15 provincias y un municipio especial llamado «La isla de la juventud» que se ubica al sur occidental de Cuba. Estas transformaciones y Divisiones Territoriales quedan explicadas y argumentadas de forma diáfana en este trabajo.

Abstract

This work explains the different territorial divisions through which the Island of Cuba has passed from its origin to the present. Important regional changes are taking place in Cuba in the course of the last four centuries and since 1600 studies have been carried out aimed at forming the Political-Administrative Division; After several years, from October 8, 1607, the island was divided into “two halves” with governments independent from each other: Havana and Santiago de Cuba, reserving the title of Captain General for the governor of Havana. Until then, the Island of Cuba was considered as a single province; This provision is included in the history of Cuba, as the first territorial segmentation undertaken by the metropolis, but it was not implemented until 1774, as a result of demographic growth, with a population of approximately 171,620 inhabitants, and considerable economic development, based on the plantation economy and the take-off of the sugar industry. At present, after 7 Administrative Political Divisions, the Island of Cuba has 15 provinces and a special municipality called “La Isla de la Juventud” which is located in the southwestern part of Cuba. These transformations and territorial divisions are clearly explained and argued in this work.

Palabras claves: [Regiones](#), [Territorios](#), [División Político Administrativa](#), [Desarrollo Territorial](#), [Antecedente Regionales](#), [División Político Administrativa en Cuba](#)

Palabras clave: [Regions](#), [Territories](#), [Administrative Political Division](#), [Territorial Development](#), [Regional Background](#), [Administrative Political Division in Cuba](#).

*Departamento de Economía. Facultad de Ciencias Económicas.
Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas.
Profesor Titular.
ejmendez@uclv.edu.cu
mendezdelgadoelie@gmail.com
mlloret@nauta.cu
Profesor Auxiliar
mlloret@uclv.edu.cu
mlloret@nauta.cu*

*Recepción 22/04/2021
Aprobación 22/05/2021*

INTRODUCCIÓN

La División Político Administrativa (DPA) de un país puede ser cambiante en el tiempo y ajustarse al desarrollo que va teniendo, hay factores formadores de regiones, que facilitan el mejor desempeño territorial y local, tendientes a equilibrar las regiones y zonas, para facilitar el aprovechamiento al máximo los recursos endógenos y posibilitar un desarrollo armónico; en el caso de Cuba se aprecian cambios regionales significativos en el transcurso de los últimos cuatro siglos.

En 1510 fue creada la Gobernación de Cuba dentro del Virreinato de la Nueva España, dependiente de la Real Audiencia de Santo Domingo, con capital en Santiago de Cuba y se fundan las 7 primeras villas en la Isla de Cuba: Baracoa, Bayamo, Santiago de Cuba, Puerto Príncipe, Trinidad, Sancti Spiritus y San Cristóbal de La Habana.

Alrededor del 1560, cuando la población aborigen de la Isla se estimó en 200 000 habitantes, el Padre Bartolomé de las Casas concibió más de una veintena de regiones; estas fueron conocidas como Maisí, Bany, Sagua, Maniabón, Barajagua, Bayamo, Mayné, Guaynaga, Bayaquitirí, Macaca, Boyuca, Cueiba, Cayaguayo, Guaymaro, Camagüey, Ornofay, Cubanacán, Guamuhaya, Mangón, Jagua, Sabaneque, Habanana, Marién, Guaniguanico y Guahacabibes. Estas fueron las primeras regiones que se conocieron en Cuba y desde entonces, hasta el año 2021 se han dado transformaciones significativas, tal como se podrá apreciar en el desarrollo de este trabajo.

El objetivo de este trabajo es explicar, ordenar y sistematizar los aspectos que a juicio de los autores caracterizan desde los aborígenes hasta el presente las diferentes divisiones territoriales por las que ha transitado la Isla de Cuba.

DESARROLLO

Desde el año 1600 en Cuba se comenzaron a realizar estudios dirigidos a conformar la DPA, y después de varios años, el 8 de octubre de 1607 mediante la real cédula expedida por el rey Felipe III, la Isla quedó dividida en «dos mitades» con gobiernos independientes uno del otro: La Habana y Santiago de Cuba, reservándose al gobernador de La Habana el título de Capitán General. Hasta entonces la Isla de Cuba fue considerada como una sola provincia; esta disposición se recoge en la historia de Cuba, como la primera segmentación territorial emprendida por la metrópolis, pero no fue ejecutada hasta 1774, a consecuencia de un crecimiento demográfico, con una población de aproximadamente 171 620 habitantes, y un desarrollo económico considerable, basado en la economía de pla-



Mapa N.º.1. 1ra. DPA en 1774

tación y el despegue de la industria azucarera.

En el Mapa N.º.1 se aprecia que la isla comprendía solo dos departamentos: el Oriental o de Santiago de Cuba, con sede en esa ciudad (en el territorio que hoy ocupan las cinco provincias orientales) y el Occidental o de La Habana (desde las actuales provincias de Pinar del Río hasta Camagüey), incluida la entonces Isla de Pinos, con cabecera en la Villa de San Cristóbal de La Habana, convertida en capital floreciente.

La evolución histórica de DPA denota una estrecha relación con la demografía; pues en la medida en que el país ha crecido en población se han tenido que ajustar las estructuras territoriales de la época. Otras dos divisiones tuvieron lugar durante el siglo XIX. La primera, después de 53 años, en 1827 los departamentos se convirtieron en tres: el Oriental que conservó básicamente la misma superficie, mientras el Occidental abarcaba la geografía comprendida hoy de Pinar del Río a Matanzas, más la Isla de Pinos.

Departamento Central fue el nombre de la Región que contemplaba el área de los actuales territorios de una parte de la actual provincia de Las Tunas, la actual provincia de Camagüey, Ciego de Ávila, Sancti Spíritus, Villa Clara y Cienfuegos; incluso ocupaba una parte importante de la actual provincia de Matanzas, lo que es hoy el municipio de la Ciénaga de Zapata, como se puede ver en el Mapa N.º.2. La capital de este Departamento Central en ese momento merecía ser Trinidad, pues era la ciudad donde se localizaba un importante núcleo poblacional y tenía el desarrollo azucarero encabezado por el Valle de los Ingenios; curiosamente en estos años Trinidad llegó a identificarse más con Cartagena de India en Colombia,



Mapa N.º.2. 2da. DPA en 1827, después de 53 años.



Mapa N°3. 3ra. DPA en 1878, después de 51 años

que con la Ciudad de Sancti Spiritus que estaba muy cerca geográficamente de Trinidad.

Ya a mediados de la centuria, los habitantes de Cuba sobrepasaban el millón. La denominación de provincias aparece por vez primera en 1878, cuando por el Real Decreto del 9 de junio de ese año, se dicta la creación de áreas determinadas para ese fin.

Las razones políticas, más que las geográficas y demográficas fueron las que motivaron a la metrópolis a dividir la Isla en seis porciones. Una vez concluida la Guerra de los Diez Años y escenificada la Protesta de Baraguá, el gobierno español se vio precisado a ofrecer determinadas concesiones (las cuales nunca cumplió) a los insurrectos cubanos, entre ellas la de tener representación en las Cortes españolas. Ello explica la división por provincias a fin de elegir diputados por cada una de ellas: Santiago de Cuba, Puerto Príncipe, Santa Clara, Matanzas, La Habana y Pinar del Río, con sedes principales en las ciudades de igual nombre, fueron las jurisdicciones establecidas en Cuba. La Isla de Pinos perteneció entonces a la provincia de La Habana.

El aumento de la natalidad en la Isla de Cuba y las migraciones europeas al país, luego de la Segunda Guerra Mundial, motivaron que la población creciera hasta alrededor de los 5 829 029 habitantes en 1953, fecha en que tuvo lugar una nueva DPA.

En esta oportunidad se mantuvieron aproximadamente los límites territoriales, pero cambiaron los nombres de algunas provincias. Santa Clara pasó a llamarse Las Villas; Puerto Príncipe, se le llamó Camagüey, mientras Santiago de Cuba se nombró Oriente.

El incipiente desarrollo municipal en Cuba tuvo su origen en las grandes deformaciones y desigualdades socioeconómicas previas al triunfo de la revolución en enero

de 1959 y por tanto, parte de la necesidad impostergable de encaminar los esfuerzos hacia el ordenamiento de los territorios en aras del desarrollo demandado por el proceso revolucionario en auge. Los orígenes y rasgos del diseño territorial y local en la isla se remontan al pasado colonial y se extienden al período republicano previo al triunfo revolucionario; con la Constitución de 1901 se dan los primeros pasos relacionados con las estructuras y poderes locales; más tarde, en la Constitución de 1940, entonces una de las más avanzadas del continente, se asentó la necesidad de fortalecer la actividad de las localidades o municipios. A mediados de siglo XX Cuba contaba con 126 municipios distribuidos irregularmente en las seis provincias, por ejemplo, 26 en La Habana, contra sólo nueve en Camagüey.

Desde los primeros años del triunfo revolucionario se incorporó la región como un estabón intermedio entre la provincia y el municipio. Mas ese elemento provocó cierto distanciamiento en la ejecución de acciones de la Dirección nacional y la base, y fue suprimido en el contexto de creación de las 14 provincias y los 169 municipios, en 1976.

En 1970 hay otra DPA, la que mantuvo las seis provincias, con los nombres determinados en 1953, pero con ajustes territoriales en los límites de algunas. La Habana tomó de Pinar del Río los municipios de Mariel, Artemisa y Guanajay; Las Villas cedió a Matanzas la Ciénaga de Zapata, y Oriente creció sobre Camagüey en las áreas que ocupan los municipios de Amancio Rodríguez, y Colombia.

Como un paso significativo en la institucionalización del país, luego de más de 15 años de aplicación de experiencias, la Revolución cubana acomete la renovación total de las legislaciones heredadas de la etapa colonial. El Partido y el Gobierno Revolucionario consideraron factible la creación de nuevas formas del Poder Popular. En uno de los «Por cuantos», la Ley 1269 del 3 de mayo de 1974 plantea **«... instituir la elección de los Órganos del Poder Popular, de modo que las masas queden incorporadas institucionalmente a la dirección estatal y administrativa y que el pueblo forme parte directa de los órganos del Estado, plenamente identificado con este como Estado Socialista de los trabajadores,**



Mapa N°4. 4ta. DPA en 1953, después de 75 años



Mapa N°5. 5ta. DPA en 1970, después de 17 años.



Mapa N.º 6. 6ta. DPA en 1976, después de 6 años

profundamente democrático... »

Una resolución del Primer Congreso del Partido Comunista de Cuba, en diciembre de 1975 indicó la aplicación de una nueva DPA del país, con la finalidad de lograr una vinculación más directa entre la dirección nacional y la base, en correspondencia con las exigencias de nuestro desarrollo económico y social planificado.

Al año siguiente el número de provincias aumentó a 14 y se decidió la figura del Municipio Especial Isla de Pinos, que a partir de 1978 recibió el nombre de Isla de la Juventud. Ese territorio pasó a ser atendido directamente por el nivel central.

Esta DPA multiplicó la antigua provincia de Oriente por cinco: Guantánamo, Santiago de Cuba, Granma, Holguín y Las Tunas. Camagüey cedió parte de su superficie a la nueva provincia de Ciego de Ávila. La provincia de Las Villas pasó a llamarse Villa Clara y disminuyó su territorio en favor de la creación de las provincias de Cienfuegos y Sancti Spíritus.

La provincia de La Habana se convirtió en dos: Ciudad de La Habana, donde se localiza la capital del país, La Habana, y la inmensa provincia de La Habana (19 municipios) con la peculiaridad de no contar con una ciudad cabecera.

El territorio nacional quedó conformado, según esta DPA en 14 provincias y 169 municipios, incluyendo el municipio especial Isla de la Juventud. La capital del país es La Habana. Las 14 provincias son: Pinar del Río, Ciudad de La Habana, La Habana, Matanzas, Villa Clara, Cienfuegos, Sancti Spíritus, Ciego de Ávila, Camagüey, Las Tunas, Holguín, Granma, Santiago de Cuba y Guantánamo. La mayor parte de las capitales de provincia tienen el mismo nombre de éstas.

Las ciudades más importantes con esa DPA son: La Habana (capital del país y de las provincias de Ciudad de La Habana y La Habana), Pinar del Río (capital de provincia), Matanzas (capital de provincia), Santa Clara (capital de la provincia de Villa Clara), Cienfuegos (capital de provincia), Sancti Spíritus (capital de provincia), Trinidad (ciudad cabecera del municipio de igual nombre, provincia de Sancti Spíritus), Ciego de Ávila (capital de provincia), Camagüey (capital de provincia), Las Tunas (capital de provincia), Holguín (capital de provincia), Manzanillo (ciudad cabecera

del municipio de igual nombre, provincia de Granma), Bayamo (capital de la provincia Granma), Santiago de Cuba (capital de provincia), Guantánamo (capital de provincia), Baracoa (ciudad cabecera del municipio de igual nombre, provincia de Guantánamo), y Nueva Gerona (capital del municipio especial Isla de la Juventud).

La división política administrativa del 2011

La DPA más reciente, que entró en vigor con el inicio del año 2011, pretendió una organización más racional a favor de los servicios a la población, y mayor funcionalidad para las labores de los gobiernos y las administraciones. Además entre otros objetivos pretendió la reducción de plantillas y locales, a partir de la ubicación de organizaciones políticas y de masas, y entidades del Poder Popular en una misma edificación; se pretende entre otros aspectos hacer más racionalidad el número de cuadros de dirección aprobados en los niveles e instituciones de las nuevas provincias de Artemisa y Mayabeque, pues ahora solo constituyen el 50 % de la cantidad que se desempeñaba en la entonces provincia de La Habana.

Además la modificación planteada para las provincias occidentales (Pinar del Río, Artemisa y Mayabeque) ofrece coherencia desde el punto de vista del número de municipios (11 cada una), lo cual reduce la distancia entre los



Mapa N.º 7. 7ma. DPA en 2011, después de 35 años (Nuevas provincias de Artemisa y Mayabeque).

municipios y la cabecera provincial; el contar con una capital territorial favorece a la identidad y el fortalecimiento del sentido de pertenencia.

La nueva provincia de Artemisa recibe tres municipios pinareños: Bahía Honda, San Cristóbal y Candelaria y tiene su capital en el municipio de igual nombre, mientras Mayabeque asume como cabecera y Capital a San José de las Lajas. De esta manera se pone fin a la dependencia que durante 35 años de existencia tuvo la provincia de La Habana de localizar su centro en la capital del país y no en territorio propio.

El perímetro de lo que desde 1976 fue Ciudad de La Habana recupera su nombre histórico: La Habana, demarcación que recibe porciones de tierra alrededor de la Escuela Latinoamericana de Medicina, la Universidad de las Ciencias Informáticas, el lado este de la meseta de El Cacahual, y asentamientos poblacionales Tirabeque 1 y 2, hasta ahora pertenecientes a Bejucal.

Varadero deja de ser municipio para integrarse al de Cárdenas como era antes de la DPA de 1976. La península de Hicacos, más el área existente hasta el hotel Oasis, se constituye en zona de administración especial subordinada al Consejo de Ministros. Con esta modificación, al salir Varadero de la relación de los municipios del país, se reduce en uno el número de estos y en total son 168 los municipios el país.

La más oriental de las provincias solo ajusta sus límites entre los municipios de Guantánamo, Manuel Tames y Yateras como podrá apreciarse en los mapas que aparecen seguidamente donde explican detalladamente las provincias que sufren transformación en sus límites geográficos.

Al tratarse de un proyecto que modificó la Ley 1304 de julio de 1976, se sometió a la consideración de los diputados y se aprobó en un Periodo Ordinario de sesiones de la Asamblea Nacional del Poder Popular.

La Ciudad de La Habana recibió de la anterior provincia de La Habana la franja costera desde el río Santa Ana hasta el borde oeste de la Escuela Latinoamericana de Medicina (ELAM) y el área de autoabastecimiento de la Universidad de Ciencias Informáticas (UCI). Además, la capital adicionó el lado este de la Meseta del Cacahual, antes perteneciente al municipio de Bejucal, donde

se encontraba en centro de Centro Nacional conocido por CENPALAB, y los asentamientos poblacionales de Tirabeque 1 y 2. En total la capital asumió 5,75 km cuadrados nuevos.

Generalidades sobre el nuevo codificador de la DPA que comenzó a regir a partir de enero del 2010.

El **Codificador de la División Político-Administrativa (CoDPA)** puesto en vigor mediante la resolución 129/2010 el 25 de Octubre de 2010, se conformó como instrumento de trabajo para la codificación de las unidades político administrativas en que se dividió el territorio nacional, de forma tal, que permitió la uniformidad en el procesamiento de las estadísticas continuas, las encuestas y los censos incluidos en el Sistema Estadístico Nacional; cuya rectoría metodológica corresponde a la Oficina Nacional de Estadística e Información (ONEI), así como para otros requerimientos que necesitan ubicación geográfica. A los efectos de este Nuevo Codificador se entenderá por territorio a las 15 provincias más el municipio especial de la Isla de la Juventud, definiéndose un total de 16 territorios a nivel nacional.

Para la codificación se mantiene la clave numérica confeccionada sobre la base de los principios del Sistema Decimal, componiéndose esta por 4 dígitos numéricos, los dos primeros de izquierda a derecha identifican la provincia y los dos últimos identifican al municipio.

La determinación de la clave numérica se ha hecho conservando el principio cartográfico establecido para la localización: de oeste a este y de norte a sur, tratándose de obtener la línea de continuidad más aproximada posible al derrotero.

Con vistas a mantener la comparabilidad de la información estadística con el menor margen de error, la ONEI ha considerado que es conveniente comenzar la nueva codificación por el número 21 para la provincia de Pinar del Río, 22 para la nueva provincia de Artemisa, 23 para La Habana, 24 para Mayabeque y así sucesivamente hasta Guantánamo con el 35. De igual forma se cambia la codificación del municipio especial Isla de la Juventud de 99.01 a 40.01, en el entendido que el 99, en el lenguaje de clasificadores, se reserva para cuando la información es desconocida.

Para facilitar el trabajo de adaptación, la ONEI ha elaborado un correlacionador con ambas codificaciones de la DPA, que permitirá adecuar la información de años anteriores para hacerlas comparables y estén disponibles para las publicaciones e investigaciones futuras que se realicen. Los interesados pueden informarse con más detalle en el sitio de la ONEI en <http://www.onei.gob.cu/> en el acápite de Registros y Clasificadores. <http://www.onei.gob.cu/node/14086>



Mapa N°8. 7ma. DPA en 2011, después de 35 años

CONCLUSIONES

Las diferentes Divisiones Político-administrativas por las que ha transitado la isla de Cuba son el resultado del desarrollo socioeconómico y demográfico que ha tenido el país desde sus orígenes hasta la actualidad.

Las Divisiones Político Administrativas de la isla de Cuba han facilitado la organización, planificación y control de toda la actividades de dirección económica, territorial y local.

Cuba cuenta con un Codificador de la División Político-Administrativa (CoDPA), teniendo en cuenta los cambios aprobados por la Asamblea Nacional del Poder Popular en la sesión del 1º de Agosto de 2010, en la cual se aprobó la Ley No. 110 «Modificativa de la Ley No. 1304 de 3 de Julio de 1976 de la División Político Administrativa» de la República de Cuba. El CoDPA tiene como objetivo, servir de instrumento de trabajo para la codificación de una forma uniforme, de las provincias y municipios en que se divide el territorio nacional, para todos aquellos trabajos e investigaciones en que se requiera ubicación geográfica.

BIBLIOGRAFÍA

Alfredo Mateo Domingo. Historia de la división político-administrativa (1607-1976).

Atlas demográfico de Cuba, 1979.

Consultas a la Oficina Nacional de Estadísticas e Información de Cuba.

<http://www.onei.gob.cu/>

<http://www.onei.gob.cu/node/14086>

<http://www.juventudrebelde.cu/cuba/2010-08-01/cuba-con-nueva-division-politico-administrativa/>

<http://www.radiorebelde.cu/noticia/publica-gacetita-oficial-nueva-ley-division-politico-administrativa-cuba-20100916/>

http://www.ecured.cu/index.php/Organizaci%C3%B3n_pol%C3%ADtico-administrativa_de_Cuba

http://www.bedincuba.com/cuba/cuba_informacion_geografia_division_politico_administrativa.htm

<http://www.cubaportal.org/paginas/conocercuba.aspx?id=304>

<http://verbielara.wordpress.com/2011/01/04/cuba-inicio-el-2011-con-nueva-division-politico-administrativa/>

http://www.onei.gob.cu/ryc_dpa.htm

https://es.wikipedia.org/wiki/Historia_territorial_de_Cuba

Sobre los autores

Dr. C. Elier Méndez Delgado

Licenciado en economía por la Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas; Master en Desarrollo Económico por la Universidad de Oviedo, en España; Doctor en Ciencias Económicas, por la Universidad de la Habana, egresado de 5 Diplomados de Organismos de Naciones Unidas. Se ha desempeñado como profesor de la Universidad Central de Las Villas, en Cuba desde el año 1982, hasta la fecha; ha sido profesor invitado de varias Universidades Iberoamericanas, (Se destacan Colombia, España, Venezuela y Ecuador). Ha colaborado con las investigaciones sobre Desarrollo Humano realizadas en Cuba; ha impartido cursos de postgrados en temas sobre la Medición Macroeconómica, en Desarrollo Territorial y Local en Cuba y sobre estos y otros temas económicos ha publicado, más de 50 artículos en revistas nacionales e internacionales; además de folletos y libros; ha participado en diferentes trabajos de investigación y ha asesorado considerables investigaciones a nivel de Licenciatura, Diplomados, Maestría y Doctorados. Ha participado en múltiples eventos de carácter nacional e internacional, entre los que sobresalen la II Conferencia Internacional en Equidad en Salud que se realizó en la Universidad de Toronto, Canadá, del 14-16 de junio de 2002 y el Taller de la Organización Panamericana de la salud (OPS) en la Universidad de Toronto en Canadá del 17 al 18 de junio de 2002. Ha publicado trabajos en revistas especializadas sobre el Desarrollo Humano y otros temas de medición del desarrollo; participó en la II Conferencia Latinoamericana y del Caribe sobre Desarrollo Humano y enfoque de capacidades en Montevideo; Uruguay del 14 al 18 de Octubre del 2008. En septiembre del 2009, fue designado por el Ministro de Economía y Planificación de la República de Cuba para emprender y asesorar las Iniciativas de Desarrollo Municipal en la provincia donde reside, tarea que cumplió exitosamente. Se ha desempeñado como profesor e investigador universitario en varias universidades e instituciones de educación superior de Iberoamérica. Participó en el tribunal nacional para las defensas de doctorado en Economía Aplicada en la República de Cuba durante años y se mantiene activo como reserva de este tribunal, además se desempeñó durante 20 años como experto en Cuentas Nacionales de la CEPAL desde el año 1995 (LC/R.1607); el docente forma parte de la Junta de Acreditación Nacional en Cuba.

La evolución del posicionamiento. Una historia de superación

REVISTA **MAPPING**
Vol. 29, 204, 30-39
2021
ISSN: 1131-9100

The evolution of positioning. A history of overcoming

Marcelino Valdés Pérez de Vargas

Resumen

El ser humano ha necesitado desde hace muchos siglos determinar su posición en la Tierra, en principio para navegar en barco, pero hoy en día para multitud de aplicaciones que utilizan nuestra ubicación precisa, desde los navegadores que nos informan en cada momento del camino óptimo para llegar a nuestro destino, hasta las aplicaciones que nos ofrecen cines, restaurantes y todo tipo de establecimientos y recursos más cercanos a nuestra posición. En este artículo, que es una fiel transcripción de la charla del mismo título impartida por el autor dentro del ciclo de conferencias del 150 aniversario del Instituto Geográfico Nacional, se resume la historia de los procedimientos y técnicas empleados por la humanidad para conocer con precisión su posición sobre la superficie terrestre, una cuestión que no es trivial solucionar satisfactoriamente, máxime si se necesita un resultado de alta precisión.

Abstract

The human being has needed for many centuries to determine its position on Earth, in principle to navigate by boat, but today for many applications that use our precise location, from the browsers that inform us at every moment of the optimal way to reach our destination, to the applications offered by cinemas, restaurants and all kinds of establishments and resources closest to our position. In this article, which is a faithful transcript of the talk of the same title given by the author within the cycle of conferences of the 150th anniversary of the National Geographic Institute, the history of the procedures and techniques used by humanity to accurately know their position on the earth's surface, a question that is not trivial to solve satisfactorily, especially if a result of high precision is needed.

Palabras clave: Posicionamiento, Geodesia, GNSS, GPS, Sistema de Referencia de Coordenadas, *datum*, proyección.

Keywords: Positioning, Geodesy, GNSS, GPS, Coordinates Reference System, datum, projection

Instituto Geográfico Nacional
mvaldes@fomento.es

Recepción 31/01/2021
Aprobación 18/03/2021

1. INTRODUCCIÓN

En primer lugar, tengo que decir que resulta para mí realmente apasionante el tener la oportunidad de participar en este ciclo de conferencias que celebra, nada más y nada menos, que los 150 años de historia del Instituto Geográfico Nacional, una casa en la que llevo trabajando ya 20 años y espero seguir trabajando muchos más.

Para empezar, me gustaría explicarles a qué me dedico. Soy geodesta y trabajo en Geodesia, que se ocupa de estudiar la forma y dimensiones del planeta Tierra, además de sus variaciones en el tiempo. Para ello, se puede decir que lo que hacemos generalmente es calcular posiciones de puntos sobre la superficie terrestre, para lo cual es necesario especializarse tanto en los métodos de posicionamiento como en los instrumentos que se utilizan y en los sistemas de referencia geodésicos en lo que hay que expresar las posiciones mencionadas mediante coordenadas. La Geodesia no es muy conocida, pero sin ella no habría cartografía, ni catastro, ni grandes obras públicas, ni se podrían lanzar cohetes ni tendríamos satélites artificiales, es más tampoco podríamos salir en coche y buscar una gasolinera mediante nuestro navegador.

Una vez explicado qué es la Geodesia y ya que estamos aquí celebrando una efeméride histórica, creo que puede ser adecuado repasar la historia y evolución del posicionamiento es decir, lo que vamos a recorrer brevemente los instrumentos, la metodología empleadas en ello, junto con lo que se sabía en cada momento sobre la forma de la Tierra, para poder realizar así el posicionamiento sobre su superficie. Intentaremos subrayar en esta pequeña historia cuál ha sido la participación de nuestros compatriotas y en especial, cuál ha sido la participación del Instituto Geográfico nacional (IGN).

Empecemos imaginando la situación que hemos visto y leído en muchas historias de aventuras, cuando lo protagonistas están perdidos, por ejemplo, en el desierto y no tienen ninguna referencia para orientarse. Esa situación es terrible y realmente hay un problema de supervivencia. En ocasiones, saber la posición sobre la superficie terrestre, al menos la situación relativa, por ejemplo, respecto al oasis más cercano, es una cuestión de vida o muerte. Pero hay también otras aplicaciones muy importantes, como la elaboración de cartografía, los usos militares, el conocimiento del territorio o simplemente la localización del recurso más necesario en cada situación, sea un oasis, una gasolinera, un restaurante o una población. Las aplicaciones de posicionamiento suelen enfocarse en dos di-

recciones muy diferentes: unas necesitan optimizar la rapidez en obtener la respuesta, aunque sea solo aproximada, como ocurre en las aplicaciones de navegación, y hay otras que no necesitan tiempos de respuesta tan cortos, pero requieren que la posición sea lo más precisa posible, en cuyo caso estaríamos hablando de aplicaciones geodésicas.

Antes de continuar, quisiera hacer una aclaración sobre la importancia de los sistemas de referencia en Geodesia y para ello, vamos a utilizar un ejemplo. Imaginense que yo quisiera indicar a una de las personas del público. Podría decir que se trata de la persona que está sentada en la tercera fila y en la cuarta columna, pero ¿qué es exactamente una fila? ¿Cómo se definen las columnas? ¿Desde dónde se empiezan a contar? Es decir, para entendernos sin ambigüedades es necesario establecer un sistema de referencia convenido y aceptado, una referencia que consista básicamente en un origen, un sistema de ejes de coordenadas y unas unidades de medida. Cuanto mejor y con mayor precisión esté definido ese sistema de referencia, mejores serán las posiciones que obtengamos.

Hay varios tipos de sistemas de referencia. En el ejemplo del desierto mencionado, lo que haría falta sería un sistema que nos diera una orientación, es decir hacia dónde andar, y una distancia aproximada. Ese sería un sistema relativo y regional. En esta charla nos vamos a ocupar de los sistemas globales que permiten un posicionamiento global respecto de la Tierra en su conjunto. En ese caso, parece lógico pensar que el origen debe ser el centro, el centro de gravedad de la Tierra y parece también sensato que uno de los ejes sea el eje de rotación de nuestro planeta. A partir de ahí, si se definen planos perpendiculares al eje de rotación, al cortar la superficie de la Tierra tendremos los paralelos si se definen planos que contengan a ese eje, al cortar la superficie terrestre tendremos los meridianos. Así tendríamos ya una red de paralelos y meridianos y podríamos definir coordenadas.



En realidad, hoy en día y dadas las precisiones que se necesitan, el centro de la Tierra y su eje de giro no son suficientemente estables y permanentes, sufren variaciones. Las referencias fijas que se utilizan están muy, muy lejos, son los quásares, referencias extragalácticas que se aprovechan con una tecnología llamada Interferometría de Muy Larga Base (VLBI). Con esa tecnología situamos los sistemas de referencia celestes y con éstos, los sistemas de referencia geodésicos.

2. LOS ORÍGENES DEL POSICIONAMIENTO

Vamos a empezar nuestra historia. Pensemos en las horas de homínidos de la prehistoria que ya entonces necesitarían posicionarse y más si eran nómadas, tendrían que saber dónde estaban las manadas de búfalos, los árboles con fruta, el agua en épocas de sequía, ¿cómo se posicionarían esos primeros homínidos?

Voy a poner otro ejemplo un poco más reciente. Unos 1700 años antes de Cristo, Abraham salió de Ur y llegó a Palestina. ¿Cómo se posicionaría? En este caso podemos suponer que utilizaría un posicionamiento de tipo regional, lo que conocía eran referencias en forma de accidentes geográficos: una montaña, una sierra, un río, un vado y a partir de ellos era capaz de reconstruir una ruta.

Pero como precedentes de posicionamiento global, podemos recordar las ruinas de Stonehenge, en Inglaterra, un círculo de menhires orientados hacia los solsticios. Ese monumento está datado entre 2000 y 3000 años antes de Cristo, y es una prueba de que ya entonces había cierto conocimiento de Astronomía y se observaban los astros. Eso puede muy bien considerarse el principio del posicionamiento global. Otro ejemplo son las pirámides de Egipto, construidas aproximadamente 2500 años antes de Cristo, que como sabréis están asombrosamente bien orientadas

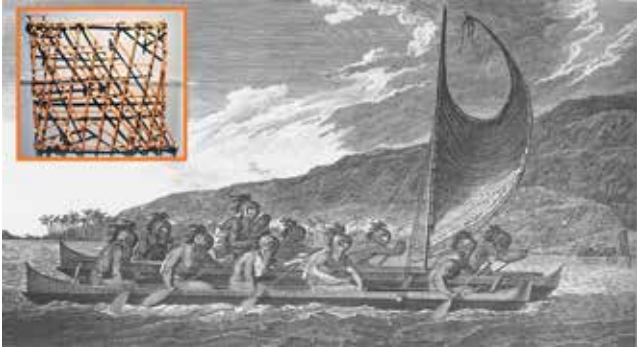
en la dirección Norte-Sur, lo que también requiere un conocimiento de los astros y la capacidad de realizar observaciones meticulosas.

No se sabe si fueron primero los egipcios o los babilonios, pero 1000 años antes de Cristo ya se conocía el primer instrumento de posicionamiento de la historia y además el más sencillo, el gnomon. Ha sido extremadamente muy útil a lo largo de la historia y ha tenido tres aplicaciones principales: puede servir de reloj de sol, porque consiste en un mástil y un plano, en el que se ve cómo se mueve la sombra del Sol; otra utilidad es que si se observa la sombra durante todo el día, la dirección de la sombra más corta marca la dirección Norte-Sur, la línea meridiana, con lo que sirve para orientar, y además, si se observa el mismo gnomon en puntos de diferente latitud, la relación entre la sombra al mediodía y la altura del mástil nos da la diferencia de latitud entre dos puntos. Esta última aplicación como veremos tendrá una extraordinaria relevancia en la historia del posicionamiento global.

3. EL POSICIONAMIENTO EN LA NAVEGACIÓN MARÍTIMA DE LA ANTIGÜEDAD

Históricamente, las primeras aplicaciones avanzadas de las técnicas de posicionamiento aparecen en la navegación, sobre todo en la navegación marítima de altura, existe una navegación de cabotaje, que sigue la línea de costa y se orienta en función de sus accidentes, en la que se emplea un posicionamiento relativo regional. El problema de difícil solución aparece cuando uno se aleja de la costa y solo tiene el firmamento y la lámina del mar como referencia visual. Los primeros pueblos que conocemos que ya navegaban por los mares grandes distancias fueron los antiguos pueblos polinesios, entre 3000 y 1000 años antes de Cristo. En esa época habitaron las islas de la Polinesia y se movían de unas islas a otras. Suponemos que ya conocían el comportamiento de los astros, también podían utilizar las corrientes marinas, los vientos, incluso los patrones de interferencia de las olas de los diferentes islas y atolones que se encontraban. Lo que sí es cierto es que transmitían sus conocimientos de una generación a otra oralmente, contando historias y mediante canciones. Una importante novedad es que tenían una primera cartografía rudimentaria, los llamados mapas de palos, en los que representaban con palos atados, como el de la figura, las posiciones de las islas y la dirección de las corrientes.





El primer precedente de navegación marítima de altura con técnicas de posicionamiento y orientación en nuestro entorno geográfico y cultural más cercano, en el Mediterráneo, aparece con los pueblos fenicios, entre 1200 y 500 años antes de Cristo. Los fenicios ya navegaban de noche, conocían la Estrella Polar y la Osa Menor, y llegaron navegando hasta las llamadas columnas de Hércules, es decir hasta el Estrecho de Gibraltar y comenzaron incluso a internarse en el Océano Atlántico. Para orientarse adicionalmente utilizaban las corrientes marinas y también usaban las aves que avistaban en sus travesías e incluso, llevaban sus propias aves para soltarlas en un momento dado y ver qué dirección tomaban para volver a casa.

Los griegos sucedieron a los fenicios en el dominio del posicionamiento en el mar Mediterráneo para la navegación marítima. Los pueblos griegos desarrollaron notablemente la navegación, mejoraron las embarcaciones y, lo que es más importante, tenían un conocimiento mucho más profundo de los astros y sus movimientos. Como novedad, utilizaban cartas para recordar las rutas que habían seguido. En un pecio griego, debido a un naufragio producido al lado de la isla de Antikythera, se encontró una máquina, el llamado mecanismo de Antikythera. Se trata de un mecanismo de engranajes que parece ser que podía predecir las posiciones de los astros, los eclipses o las diferentes épocas griegas, como la época de las Olimpiadas. Podemos preguntarnos si se podría tratar de la primera máquina de posicionamiento. Ya que al haberse encontrado en un naufragio yo me pregunté si bien podría ser por su posible uso para el posicionamiento pero,

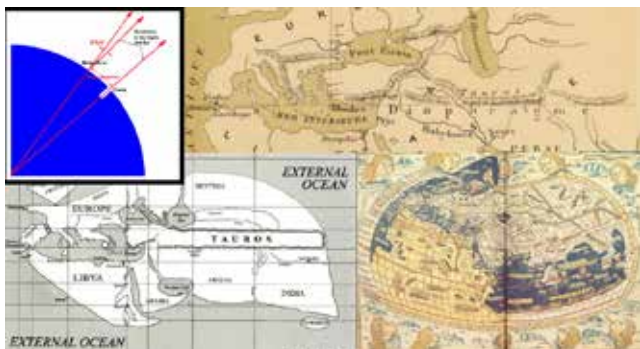


aunque no lo fuera, demuestra en cualquier caso que los griegos tenían un profundo conocimiento de los fenómenos astronómicos lo que supone un claro avance para las posibilidades del posicionamiento.

4. EL POSICIONAMIENTO EN LA GEODESIA DE LA ANTIGÜEDAD

La civilización griega brilló en la navegación, sobre todo porque fueron los primeros que tuvieron un enfoque, digamos científico, en cuanto que trataban de entender el porqué de las cosas de forma racional y ordenada: la forma de la Tierra, sus dimensiones, las distancias a otros cuerpos celestes, etcétera. Es la primera vez en la historia de la humanidad que se generaliza la idea de que la Tierra es redonda, desde el siglo VI antes de C., y se abandona el modelo anterior de tierra plana, probablemente como resultado de la observación de los eclipses lunares, en los que se ve la sombra curva de la Tierra sobre la Luna.

En cualquier caso, no solo creían que la Tierra es esférica, sino que además se atrevieron a calcular su radio, mediante un método muy curioso, que empezó a aplicarse en el siglo III antes de Cristo y se repite con los mismos fundamentos hasta el siglo XVIII: el método de la medición de un arco de meridiano. La primera medición de arco de meridiano de la historia corrió a cargo de Eratóstenes de Cyrene, aproximadamente 250 años antes de Cristo. El procedimiento consiste en que si en un círculo conocemos la longitud de un arco y el ángulo que lo subtiende, es inmediato calcular el radio a partir de esos valores. Para medir la distancia del arco se pueden utilizar diferentes métodos, incluso a falta de otro mejor, se puede estimar la distancia andando. En cuanto a la media del ángulo, se puede hacer con un gnomon, que ya hemos dicho que sirve para medir diferencias de latitud entre dos puntos, si las dos ubicaciones están en el mismo meridiano. Eratóstenes aplicó el método, tal y como se ve en la figura midiendo la distancia entre la ciudad de Alejandría, en la desembocadura del Nilo, y la ciudad de Siena, situada al Sur. Determinó la distancia aproximada entre ambos lugares por el tiempo que tardaban las caravanas en hacer ese recorrido y midió el ángulo, mediante una genialidad: aprovechar el que Siena se encuentra en el Trópico de Cáncer y por ello, hay un día al año en el que el Sol culmina exactamente en el cenit y su luz llega hasta el fondo de los pozos. Ese mismo día colocó un gnomon en Alejandría y calculó la relación entre su altura y la longitud de la sombra, y esa diferencia es exactamente la diferencia de longitudes entre ambas ciudades. Fue afortunado porque halló un valor muy cercano al real y se equivocó tan solo en unos 200 km, es decir un 3 % aproximadamente. Los



griegos realizaron más mediciones de arcos de meridiano, por ejemplo Poseidonio en el año 100 antes de C. realizó otra determinación del radio terrestre con mucha menos fortuna, ya que obtuvo un valor mucho menor. Esta falta de fortuna de Poseidonio tendría importantes repercusiones históricas, como veremos más adelante.

Los griegos, además de intentar medir el tamaño de la Tierra, trataron de representarla, para lo que crearon los primeros sistemas de referencia geodésicos. El primero de ellos que se atrevió a representar el mundo conocido, llamado Ecúmene, fue Dicearco de Mesina, en el año 300 antes de Cristo. Trazó el mapa de color crema que puede verse en la figura en el que trazó el primer meridiano de referencia, el de Rodas, y el primer paralelo, también el de Rodas. Otro mapa muy relevante es el de Eratóstenes, mucho más riguroso, basado en mediciones de gnomon y en los informes de todas las expediciones griegas que se conocían, como las de Alejandro Magno. Introdujo además una novedad importante al dibujar una cuadrícula completa de meridianos y paralelos tal como se aprecia en la Figura

El siguiente precedente importante aparece ya en la época romana, aproximadamente hacia el año 200 después de Cristo y se trata de la «Geografía» de Ptolomeo. Claudio Ptolomeo realizó mediciones en los lugares más importantes del mundo conocido, utilizando el gnomon y un instrumento nuevo: el astrolabio. Introdujo como novedad que el paralelo de referencia ya no es el de Rodas, sino el Ecuador, el mismo que utilizamos hoy en día y el meridiano de referencia ya no está en mitad del mundo conocido, en Rodas, sino que lo sitúa en las Islas Afortunadas, es decir en nuestras Islas Canarias, consideradas entonces el fin del mundo.

Siglos después, en la Edad Media podemos también encontrar algunas innovaciones interesantes relativas al posicionamiento. En el mundo árabe existió un notable desarrollo de las matemáticas y la trigonometría, que son tan importantes para el posicionamiento. Además perfeccionaron instrumentos como el astrolabio y el cuadrante, que provenía de la agrimensura romana, para medir altura de estrellas. Personajes importantes de esa época en el mundo árabe relacionados con el posicionamiento son: Al-Battani, que elaboró un catálogo sin precedentes de las



ciudades conocidas más importantes de entonces con su posición, y Al-Biruni, que realizó otra nueva medida de arco de meridiano hacia el año 1000 cerca de Bagdad, la más precisa hasta entonces, con una interesante novedad, que consistió en que usó las montañas como gnomon, cuya altura le proporcionó una mayor precisión. No podemos olvidar a los árabes de al-Andalus, como Averroes, muy notable en Astronomía, y Azarquiel, que perfeccionó el astrolabio y lo transformó en un nuevo instrumento, la azafea, útil en cualquier latitud.

El siguiente precedente importante en posicionamiento lo encontramos a miles de kilómetros de distancia, en el Lejano Oriente, en China, en donde se inventó la brújula allá por el siglo XI. Las primeras brújulas consistían, como se ve en la figura, en una placa de bronce sobre la que se situaba una especie de cucharita con un material imantado. Esa cucharita se orientaba en la línea norte-sur. Para la navegación marítima, era sencillo tomar un balde de agua, colocar un corcho y sobre el corcho, un material magnético. La brújula se fue perfeccionando y llegó a Europa hacia el siglo XII, probablemente gracias a expediciones como la de Marco Polo.

5. EL POSICIONAMIENTO EN LA NAVEGACIÓN MARÍTIMA MODERNA

Todos esos instrumentos, la brújula, el astrolabio, el cuadrante, fueron fundamentales para que pudiera llegar una gran época en la historia del conocimiento, el Renacimiento, la época de las grandes exploraciones. Los primeros grandes exploradores fueron los portugueses, pero los portugueses rara vez se alejaban de la costa. El primer navegante que se atrevió a desafiar verdaderamente al océano y navegar hacia el oeste, como saben, fue Cristóbal Colón, que se basó en un mapa del italiano Toscanelli, que utilizó el valor del radio de la Tierra de Poseidonio, el valor equivocado del que ya hemos hablado, por lo que pensaba que nuestro planeta era más pequeño de lo que realmente es. Colón creía que donde

está América encontraría China y Japón, menos mal que se encontró otro continente, si no quizás no hubiesen podido volver, hubiera supuesto muchos más meses de navegación. Colón es importante porque marca el inicio de una nueva época en el posicionamiento, la de los descubrimientos y las grandes expediciones de navegación. En esa época, desde el siglo XV hasta el siglo XVIII, se perfeccionaron y evolucionaron los instrumentos que ya hemos visto.

Para navegar, lo primero es situarse en el mapa y el método se llama 'echar el punto'. Por medio del rumbo y la distancia recorrida, se sitúa la posición del barco después de un día de navegación en la carta. Por otro lado, determinando la latitud y, lo que es mucho más difícil, la longitud, se puede situar otro punto en el mapa, y ambos puntos deben coincidir. Vamos a ver cómo evolucionó cada uno de los instrumentos que sirven para determinar estos parámetros.

La distancia se determinaba en tiempos de Colón por el método de la astilla, que consiste en tirar al agua una astilla por proa, esperar a que llegue a popa y cronometrar el tiempo con un reloj de arena, llamado ampolleta. Conocida la longitud del barco, se puede calcular aproximadamente su velocidad y conociendo la velocidad y el tiempo transcurrido, la distancia. Posteriormente apareció el método de la corredera de barquilla, que se basa en tirar una tabla lastrada por popa, la tabla se frenaba y quedaba bastante fija en el agua. Una cuerda con nudos regularmente espaciados se iba desenrollando libremente, y contando los nudos y con una ampolleta, se podía estimar la velocidad del navío. De ahí viene el nudo (1 milla náutica/h, 1852 m/h) como unidad de velocidad. Posteriormente, mucho más tarde, se inventó la corredera automática.

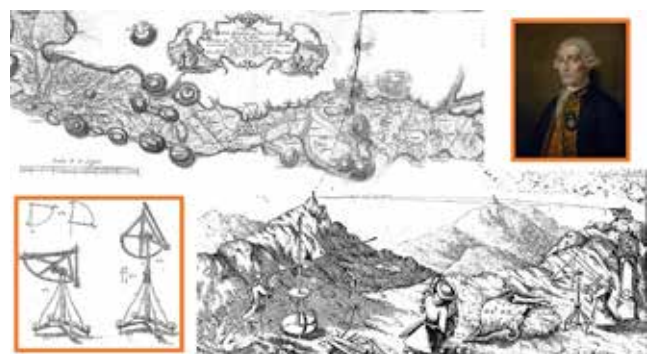
En cuanto a la dirección, era muy sencillo determinarla con la brújula. Las brújulas fueron cada vez más sofisticadas y a finales del siglo XVIII incluso se corregía por declinación magnética.

En cuanto a la determinación de la latitud, sufrió muchas mejoras a lo largo de los siglos. En la época de Colón, se usaba o bien el cuadrante, para medir la altura de los astros, preferentemente la Estrella Polar o el Sol, o bien se utilizaba el astrolabio. Posteriormente se inventó lo que

se llamaba la ballestilla, un invento muy bien ideado que permitía mayor precisión. A la ballestilla le sucedieron el cuadrante de Davis, el octógono de Hadley que incorporaba un nonio y finalmente, el sextante, instrumento que aún hoy en día tienen que llevar los barcos por si fallan los sistemas electrónicos.

En cambio, la longitud es lo más difícil de determinar y lo que más siglos se tardó en resolver. Era tan difícil de resolver, que las potencias marítimas de esos siglos, españoles, ingleses, holandeses... ofrecieron grandes sumas de dinero al que pudiese resolver el problema. Todos los métodos se basan en que si se conocen las horas solares de dos lugares en el mismo instante de tiempo, la diferencia es la diferencia de longitudes. Para ello, se puede observar un mismo fenómeno astronómico a distinta hora solar en cada punto. Por ejemplo, se utilizó la observación de un eclipse. La diferencia de las horas en las que se observó en dos lugares determinados es igual a la diferencia de longitud. Galileo propuso utilizar las lunas de Júpiter. Otro método utilizado era el llamado de distancias lunares, que a partir de las posiciones relativas del Sol y la Luna permitía determinar la longitud del lugar después de una serie de cálculos. Pero el método más simple consistía en algo tan sencillo como llevar la hora con un reloj allí a donde vaya y la diferencia de la hora solar en ese lugar con la de mi reloj me proporciona la latitud. Inicialmente se intentó llevar la hora con ampolletas, pero eran poco precisos, con relojes de péndulo, pero el movimiento de la nave los volvía inútiles y finalmente, John Harrison a finales del siglo XVIII resolvió el problema inventando el llamado cronómetro de Harrison, con el que ganó la recompensa de 20 000 libras esterlinas que ofrecía la corona inglesa.

Otra novedad importante para el posicionamiento en la navegación es el uso de la proyección llamada de Mercator, que tiene la ventaja de que conserva los ángulos. Eso quiere decir que si se navega siguiendo un rumbo fijo durante cierto periodo de tiempo, la línea que se dibuja en una carta es una línea recta, lo que simplifica mucho los cálculos en la mar. Aunque por otro lado, esa línea recta en el mapa no es la distancia más corta entre dos puntos, pero en distancias cortas, la diferencia no es muy grande.



6. LA APARICIÓN DE LA GEODESIA MODERNA

Paralelamente, a la vez que evolucionaba el posicionamiento en la navegación, se mejoraba el posicionamiento en tierra y la Geodesia. La Geodesia moderna nace con el primer antecedente que encontramos en los antiguos países bajos españoles, de los que Carlos V ordenó elaborar una cartografía en la que se empleó por primera vez el método de triangulación, que consiste básicamente en que se dispone de una red de triángulos en los que se miden todos los ángulos, cosa bastante fácil por aquel entonces, y solo es necesario medir uno de los lados, o unos pocos si se quiere, para conocer las coordenadas de todos los vértices. Medir con precisión distancias sí era un problema de difícil solución en el siglo XVI. El siguiente precedente que encontramos es que parece, según defienden algunos autores, que nuestro humanista Antonio de Nebrija realizó una medición de arco de meridiano en la Vía de la Plata. También se dice que posiblemente un famoso navegante portugués, Duarte Pacheco Pereira, realizó otra medida de arco de meridiano en Brasil; pero lo que sí sabemos con seguridad es que se efectuó una medición del arco de meridiano por Jean Fernel en el siglo XVI en Francia, entre París y Amiens, aportando como novedad la utilización del número de vueltas que daba la rueda de su carro para medir la distancia, una idea genial para la época.

En el siglo XVII también tenemos una medición de arco de meridiano en Inglaterra a cargo de Norwood, que también aportó como idea genial que utilizó en lugar de un gnomon, los campanarios de las iglesias que había entre York y Londres. Sin embargo la primera medida de arco de meridiano que podemos calificar como rigurosa y científica se realizó un poco más tarde, entre 1668 y 1669, de nuevo entre París y Amiens, y se la debemos a Picard. Las novedades que introdujo fue que utilizó para medir la distancia el método de triangulación, con aparatos con anteojo dotados de retículo, lo que era una novedad para entonces; además para medir la altura de las estrellas y poder determinar así la latitud, usó un cuadrante con tornillo micrométrico lo que hacía la medición mucho más precisa. Esa medición y determinación del radio terrestre fue importantísima, porque le sirvió a Isaac Newton para ratificar su ley de la gravitación universal. Posteriormente, los siguientes avances importantes que encontramos, aparecen también en Francia y se deben a una familia de geodestas, los Cassini, que extendieron el arco de Meridiano de París a Amiens, hasta Dunquerque, al norte, y hasta la frontera con España, al sur. Al realizar los cálculos, se dieron cuenta de algo muy curioso y es que si se determina el radio de la Tierra con la parte nor-

te del meridiano no se obtiene el mismo valor que si se toma la parte sur, lo que hizo dudar de que la Tierra fuese esférica y originó que apareciesen dos teorías: una, defendida entre otros por los Cassini y Descartes, afirmaba que la Tierra era alargada por los polos; otra, sostenida por Newton y Higgins, contemplaba la Tierra como un elipsoide de revolución achatado por los polos y se apoyaba en medidas pendulares hechas en América del Sur y en París. Para resolver esa controversia, los franceses organizaron expediciones geodésicas que viajarían a latitudes muy al norte y a un lugar cerca del Ecuador. Las regiones elegidas fueron Laponia y el antiguo Virreinato de Nueva Granada, el actual Ecuador, entonces parte de España. Es por eso que en esa expedición participaron un jovencísimo Jorge Juan, un personaje importantísimo en la historia de la Astronomía y la Geodesia españolas, y Antonio Ulloa. El resultado de estas expediciones fue que, efectivamente, la forma de la Tierra se parece más a un elipsoide de revolución achatado por los polos. En los siguientes los, se repitieron las medidas de arco de meridiano, pero había un problema muy importante y es que no había una unidad de longitud común, con lo que no se podían comparar bien los resultados. En Francia, después de la Revolución Francesa, se propuso la adopción de una medida universal para todos los países y se propuso la utilización del metro, que precisamente se definió en un principio como la diezmillonésima parte de un cuarto de meridiano terrestre, y para conocer su valor con exactitud fue necesario realizar otra medición de arco de meridiano, para lo que se tomó de nuevo el meridiano de París, pero esta vez se midió desde Dunquerque hasta Barcelona, incluso posteriormente se extendió hasta la isla de Formentera, en Baleares. En la campaña participaron los franceses Mechain y Delambre, y también los españoles, Planet, Bueno y el astrónomo Chaix entre otros. Fue una campaña que estuvo llena de problemas, ya que el mismo Mechain acabó muriendo en Castellón de la Plana de tifus y posteriormente en el intento del geodesta Aragón de extenderlo hacia Formentera, estalló la Guerra de la Independencia en España, con lo que eso suponía para la colaboración entre españoles y franceses. Tenemos que mencionar otro geodesta francés importante de esa época, que es Bordá, que introdujo importantes avances, sobre todo en la instrumentación, como el teodolito repetitivo, y participó en la unión entre Greenwich y París. Anecdóticamente, podemos recordarle también que realizó una campaña en las Islas Canarias, acompañado de los oficiales de la Armada Varela y Arguedas, en la que hizo una medición del Teide por triangulación, a partir de la medición de bases en la parte baja, una medición excepcional que es tan precisa como las que podemos hacer hoy en día.

7. EL POSICIONAMIENTO EN LA GEODESIA DEL SIGLO XIX

En el siglo XIX se produjo un gran perfeccionamiento de la instrumentación y también nuevas mediciones de arco de meridiano, no ya para averiguar el radio de la Tierra porque ya se sabe que su forma se puede aproximar mejor mediante un elipsoide achatado por los polos, sino para determinar los semiejes de ese elipsoide. Pues bien, el arco de meridiano más colosal jamás medido es el arco de Struve, medido allá por 1870. Se trata de un arco de 2820 km y se extiende desde Laponia hasta la desembocadura del Danubio en el Mar Negro, en Rumanía. Esas mediciones dieron lugar a la definición del elipsoide de Struve, que se utilizó durante cierto tiempo en la cartografía española. A ese elipsoide le suceden los de Bessel, Ayre, Clarke en Estados Unidos, Everet en la India y finalmente uno que también se utilizó en la cartografía española durante un tiempo y que proviene de principios del siglo XX, el elipsoide de Hayford.

Otra novedad muy importante para el posicionamiento en aquella época fueron las reflexiones que hicieron Gauss y Helmert sobre cuál es la mejor aproximación de la figura de la Tierra. Se dieron cuenta que la aproximación por un elipsoide de revolución no es suficiente para la tercera coordenada, la altitud, porque si no tenemos en cuenta nada más, hay lugares en los que las aguas no correrían hacia altitudes más bajas. Apareció entonces el concepto de geoide, esa figura que para hacerla más comprensible explicamos que se obtendría prolongando el nivel medio de mares y océanos por debajo de los continentes. En consecuencia, cuando estamos hablando de altitud, en realidad estamos hablando de gravedad. Tanto es así que es en esos años cuando se realizan las primeras mediciones del valor de la gravedad.

Pero ese siglo es importante sobre todo por el gran desarrollo que experimentan los mapas topográficos, los mapas básicos de cada país, sobre todo en los países más desarrollados, que para gestionar mejor sus recursos y conocer el territorio inician grandes proyectos de cartografía nacional, para lo que es necesario disponer de una red geodésica, una red de puntos de coordenadas bien conocidas sobre el territorio.

Por lo tanto, aparecen las primeras redes geodésicas, aunque cada país establece la suya de manera independiente. La primera red geodésica oficial de España tiene su origen en el datum Madrid, en el Observatorio Astronómico del Retiro, donde se encuentra el punto de origen de la red y el meridiano origen era el de Madrid. Hubo que esperar hasta 1884 para que, en la Conferencia de Washington se tomase como meridiano origen común para todos los países el meridiano de Greenwich. Por entonces, ya existía un proyecto de mapa topográfico nacional debido a Jorge Juan, que planeaba una cartografía 1:100 000 para todo el país, ya a finales del siglo

XVIII. Desgraciadamente, el convulso principio del siglo XIX en España impidió que se llevase a cabo ese proyecto. Hubo que esperar hasta 1843, cuando se creó la llamada Comisión del Mapa, en la que participó el general Ibáñez de Ibero, para que se volviese a tener un proyecto de Mapa Nacional, el Mapa 1:50 000. Inmediatamente empiezan los trabajos de planificación y desarrollo de la Primera Red Geodésica española tanto es así que en el año 1858 se observó la base fundamental, la base de Madrideojos, de unos 14 km, lo que por aquel entonces seguía constituyendo un problema de difícil solución. En este caso se optó por una regla calibrada y transportable que se iba desplazando por la base. Fue una campaña geodésica muy importante y vinieron geodestas de todo el mundo a observar cómo se realizaba. Poco después se fundaría el Instituto Geográfico Nacional, en 1870, con la geodesia ya empezada, aunque la observación de los ángulos se hizo en la década de los 70 del siglo XIX. Como puede verse en la figura, la primera red se basaba en cadenas de triángulos que seguían los paralelos y meridianos. Posteriormente, esta red se unió con las de los países colindantes. Merece especial mención el enlace realizado en 1879 con Argelia con triángulos con lados de más de 200 km. Esa campaña geodésica tuvo mucho éxito internacional, recibió premios e incluso el general Ibáñez de Ibero recibió por ello el Marquesado de Mulhacén. A continuación, se completó la red geodésica española de primer orden rellenando las zonas que dejaban esas cadenas de triángulos, trabajos que no se finalizaron hasta el año 1918. En la figura puede verse la medición de la base de Madrideojos.

8. EL POSICIONAMIENTO DEL SIGLO XX A LA ACTUALIDAD

Llegamos así al siglo XX. En cuanto a los grandes logros de ese siglo en cuanto a posicionamiento, lo primero hay que subrayar es que el desarrollo de la electrónica fue fundamental para disponer de una instrumentación más sencilla y también más precisa. Un avance muy importante fue la utilización de ondas electromagnéticas para medir distancias,



empleando la técnica llamada interferometría, inventada por Michelson, que permite tanto la medición electrónica de distancias en tierra, como la medición de la distancia a satélites (SLR), además de otra técnica importantísima, la llamada Interferometría de Muy Larga Base (VLBI) e incluso adicionalmente también es utilizada para medir la distancia recorrida por un móvil en los modernos gravímetros absolutos. Otro invento fundamental que hizo posible la aplicación de técnicas como la interferometría fue la aparición de los relojes atómicos u osciladores, que con su enorme precisión permiten que la interferometría sea la base, entre otras cosas, de los Sistemas por Satélite de Navegación Global (GNSS).

En cualquier caso, el avance más importante del siglo XX en cuanto a posicionamiento es, sin lugar a dudas, el posicionamiento por satélite. Ya desde el lanzamiento del Sputnik en el año 1957 se pensó en la posibilidad de observar satélites para calcular posiciones en tierra y fue en la década de los setenta del siglo XX cuando los americanos idearon la puesta en marcha de la primera constelación de satélites con ese fin, la constelación Transit, a la que siguió la constelación soviética TSIKADA. La utilidad de estas primeras constelaciones se basaba en observar el fenómeno Doppler, proporcionaba precisiones del orden de 1 metro y constituyó una revolución. Aunque no se podía prever lo que iba a aparecer después, los sistemas de posicionamiento global por satélite (GNSS, *Global Navigation Satellite System*) que supusieron una auténtica revolución, y que ahora todos llevamos en nuestros teléfonos móviles. El primero en aparecer fue el sistema GPS (*Global Positioning System*) militar estadounidense, luego apareció el sistema ruso militar (GLONNAS), también tenemos uno chino (Beidou) y el mejor de todos, el que va a ser más preciso y va a ofrecer más servicios, el europeo Galileo. Estos sistemas son tan importantes que el usuario puede con su navegador saber su posición con una precisión de pocos metros en tiempo real, sin hacer nada especial. Pero además, utilizando un sistema de aumentación, como el Servicio de Posicionamiento en Tiempo Real que proporciona el IGN y que se apoya fundamentalmente en la red nacional GNSS (ERGNSS), se pueden conseguir precisiones del orden del centímetro. Muchos Agricultores trabajan así para conocer la

posición de su maquinaria con precisión y dirigirla, incluso se hace lo mismo con maquinaria de obra. Pero es que además, con cálculos más sofisticados, las precisiones alcanzadas están revolucionando las aplicaciones geodésicas al acercarse al nivel del milímetro, podemos medir el movimiento de los continentes, los desplazamientos del Polo, el rebote postglacial que se produce en algunos países escandinavos debido a la retirada de los hielos de las últimas glaciaciones, las deformaciones debidas a volcanes o las previas a un seísmo. Aplicaciones tan importantes que nos están permitiendo estudiar de manera indirecta los efectos del cambio climático, y que también sirven para mitigar o intentar prever posibles desastres naturales, por ejemplo en la deformación volcánica mencionada que se usó operativamente aquí, en el Instituto Geográfico Nacional, con motivo de la erupción del volcán de la isla del Hierro.

Otro aspecto importante es que esas técnicas tan precisas han revolucionado los sistemas de referencia geodésicos. A mediados del siglo XX teníamos sistemas geodésicos de referencia de cada país independiente, pero gracias a la aparición de la informática, y el consiguiente incremento de la capacidad computación, se calcularon redes regionales, como la europea, para dar lugar a lo que llamamos sistemas continentales. Incluso esos sistemas continentales, usados en la cartografía española hasta hace poco, han quedado obsoletos, no sirven por ser locales y poco precisos, están por detrás de la instrumentación. Por todo ello se crearon los sistemas geocéntricos y globales, el primero de los cuales es el sistema estadounidense WGS, nacido con fines militares para permitir fácilmente que cada misil alcance su objetivo, aunque esté en otro continente. El siguiente en aparecer fue el sistema soviético, llamado PZ. Mientras tanto, la comunidad científica internacional, a través del Servicio Internacional de Rotación de la Tierra (IERS) definió su propio sistema geocéntrico, el ITRS (*International Terrestrial Reference System*), un sistema fundamenta que se está mejorando continuamente utilizando todas las técnicas de medición posibles (VLBI, GNSS, mediciones láser a satélite y otras). Son sistemas tan importantes que recientemente las Naciones Unidas ha publicado una resolución en la que reconocen su papel esencial para el desarrollo y el progreso, e instan a todos los países para que colaboren en su mantenimiento.



9. CONCLUSIONES Y EXPECTATIVAS

Como conclusión, vamos a ver cómo ha evolucionado el posicionamiento a lo largo de la historia. Me he permitido realizar una gráfica, véase la figura, que muestra la evolución en precisión de la posición en cada época, aunque reconoz-

co que es un empeño difícil y que puede tener algún error. Tenemos, desde los griegos, que cálculo que tendrían una incertidumbre de unos 500 km hasta la actualidad en la que se alcanzan precisiones de milímetros. Tenemos una ampliación de esa gráfica, para ver la mejora en los últimos años.

¿Qué conclusiones podemos sacar de esa gráfica? En primer lugar, que se ha mejorado sustancialmente. Al principio era más fácil mejorar, pero ahora parece que hemos llegado a un límite, el milímetro, que es muy difícil de superar. También hemos aprendido que persiguiendo una mejora continua en el posicionamiento, se han ido perfeccionando indirectamente tanto la navegación, como la Geodesia. Y hemos mejorado sobre todo porque han evolucionado la instrumentación, la tecnología y las metodologías. Pero no hay que olvidar que se ha mejorado también porque cada vez conocemos mejor la forma y dimensiones de nuestro planeta, es decir, porque ha progresado la Geodesia y hemos sabido adaptar los Sistemas de Referencia Geodésicos a la instrumentación y conocimientos de cada época.

Llegados a este punto nos podemos preguntar qué nos deparará el futuro. Creo que la instrumentación seguirá mejorando, que los GNSS seguirán siendo fundamentales. Estoy seguro que dentro de poco tendremos nuestra posición con precisión de centímetros mientras andamos por la calle y gracias a nuestro teléfono móvil. El campo del posicionamiento va a crecer considerablemente, van a llevar navegadores los drones, los vehículos, los robots y todos los dispositivos. Creo que ésa va a ser la revolución que más vamos a notar en el futuro próximo en cuanto a posicionamiento.

Por otro lado, si conseguimos unir los GNSS y la instrumentación sísmica, seremos capaces de medir con mucha precisión los movimientos de la corteza terrestre de periodo muy largo (deriva de continentes) y los movimientos de periodo muy corto (séismos), con lo que la potencialidad de esos sistemas puede ser muy considerable.

Otras novedades pueden venir de la mano de la interferometría. Si en un laboratorio podemos llegar a dar precisiones de micras, ¿por qué no va a ser posible conseguir esas precisiones en exteriores?

Otras buenas noticias pueden venir de la mano de la

geodesia relativista. Ustedes saben que por la teoría de la relatividad que el tiempo transcurre de modo distinto en función de la gravedad. Luego si observo relojes a diferente altitud y observo su comportamiento, puedo llegar a observar diferencias de gravedad, es decir, diferencias de altitud. Así, podrán usarse relojes atómicos de altísima precisión para medir diferencias de altura también con gran precisión.

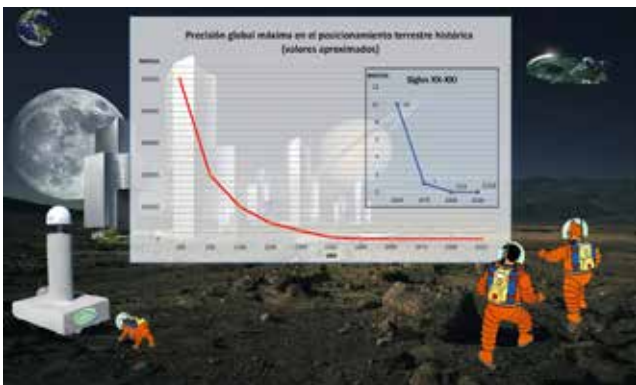
Y también auguro que se desarrollará una concepción del planeta como un todo, en el que Meteorología, Geofísica, Geodesia, Geología, etc. se unirán en el estudio del planeta como un sistema interrelacionado y complejo donde el conocimiento desde un punto de vista multidisciplinar tiene mucho que aportar. Y quién sabe si toda esta aventura del posicionamiento y todo lo que hemos aprendido, nos servirá para explorar otros planetas. Lo que sí es verdad es que el progreso en el posicionamiento ha sido una verdadera aventura de superación del ser humano y que a través de su ingenio ha ido mejorando cada vez más los resultados hasta llegar a unas precisiones que antaño parecían inalcanzables. Muchas gracias.

Sobre el autor

Marcelino Valdés Pérez de Vargas

Marcelino Valdés Pérez de Vargas es un geodesta que nació en Madrid en 1972. Ocupa el cargo de Jefe del Área de Geodesia del Instituto Geográfico Nacional (IGN), coordinando el mantenimiento y la actualización de las redes geodésicas nacionales, incluida la red GNSS nacional de estaciones permanentes (ERGNSS), la red de nivelación de alta precisión (REDNAP) y la red de mareógrafos. Además, promueve el procesamiento geodésico aprovechando las observaciones de estas redes y el resto de infraestructura geodésica del país. Comenzó a trabajar en IGN, en su departamento de Geodesia en 1998 y en la actualidad, está enfocado en la modernización del Área de Geodesia de IGN a las nuevas técnicas y procedimientos

Es Ingeniero Técnico en Topografía (1993) por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) licenciado en Ingeniería de Geodesia y Cartografía (1997) por la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) y Diplomado en Estudios Avanzados (2010) por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Es profesor asociado en la Universidad Complutense de Madrid (UCM) desde el año 2000. Además, es el Secretario de la Sección de Geodesia de la Comisión Española de Geodesia y Geofísica (CEGG) y coordinador del grupo de trabajo de la Comisión Especializada del Sistema Geodésico de Referencia.



Incertidumbre en el análisis multitemporal en terrenos escarpados debido al uso de MDE

Uncertainty in multitemporal analysis in steep terrain due to the use of DEM

Joan J. Rodríguez Jordana, M^a Amparo Núñez Andrés, Felipe Buill Pozuelo

REVISTA **MAPPING**
Vol. 29, 204, 40-53
2021
ISSN: 1131-9100

Resumen

La calidad de los modelos digitales de elevación (MDE) es fundamental en geomorfología, especialmente en los estudios multitemporales en los que se quiere reconocer los cambios de relieve mediante el cálculo del volumen erosionado o sedimentado. Generalmente, esto se consigue a partir de la comparación de MDE, obtenidos por interpolación de nubes de puntos, cuya exactitud depende de los datos y métodos de interpolación utilizados para construir el modelo. Utilizar diferentes métodos podría introducir un cambio significativo y no real en la comparación multitemporal. En este trabajo comprobaremos cómo el método de interpolación elegido (distancia inversa ponderada, *kriging*, vecino natural y red irregular triangulada), y otros parámetros influyen en la construcción del MDE en diferentes tipos de terreno. Los resultados revelan que el uso de un método u otro, en la generación de archivos ráster, para el cálculo de los cambios de volumen en el terreno, puede dar lugar a diferencias significativas en zonas de pequeña extensión en términos geomorfológicos.

Abstract

The quality of characterization in digital elevation models (DEM) is fundamental in geomorphology, especially in multitemporal studies in which we want to recognize changes in relief by calculating eroded or sedimented volume. Generally, this is achieved from DEM whose accuracy depends on the data and interpolation methods used to construct the model. Different methods could introduce a significant not real change in multitemporal comparison. In this paper we will check how the interpolation method (inverse distance weighted, *kriging*, natural neighbor and triangulated irregular network), and other parameters, influence the construction of a DEM in different terrains. The results show that, in particular, the interpolation method can have an influence. Moreover, they reveal that the use of one method or another, in the generation of files for the calculation of volume changes in the terrain, can give rise to significant differences in zones of relatively little extension in geomorphological terms.

Palabras clave: análisis multitemporal; MDE; nube de puntos; métodos de interpolación; densidad de la nube de puntos.

Keywords: multitemporal analysis; DEM; point cloud; interpolation methods; point cloud density.

Departamento de Matemáticas,
Universitat Politècnica de Catalunya
juan.rodriguez@upc.edu
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental,
Universitat Politècnica de Catalunya
m.amparo.nunez@upc.edu
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental,
Universitat Politècnica de Catalunya
felipe.buill@upc.edu

Recepción 01/01/2021
Aprobación 16/02/2021

1. INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, la generación de cartografía se basaba en modelos de puntos obtenidos mediante topografía o fotogrametría, según la escala. Se establecía previamente cuántos y qué puntos definían la superficie a representar y las líneas que marcaban los cambios significativos en la misma. En las últimas décadas, la incorporación de sensores aerotransportados como el LiDAR (*Light Detection and Ranging*) o la utilización en fotogrametría aérea de cámaras fotográficas de pequeño formato con posibilidad de trabajar con varias bandas desde un RPAS (*Remote Piloted Aircraft System*), ha determinado un nuevo paradigma en la metodología de captura de datos espaciales para la generación de cartografía y modelos digitales de elevación (*MDE*). Es importante destacar que con estas capturas masivas de datos espaciales no se discriminan los detalles de la superficie, figura 1. Por otro lado, también ha influido la generalización y automatización del *software* fotogramétrico de fácil manejo, con algoritmos eficientes (*SIFT*, *SURF*...) para la búsqueda de correspondencias entre puntos homólogos en las distintas fotografías que completan la cobertura del terreno.

Un producto derivado de los puntos y líneas de rotura altimétricas o de captura masiva de datos espaciales, y muy utilizado por su versatilidad y fácil manejo en aplicaciones SIG (Sistemas de Información Geográfica) de análisis para aplicaciones de geomorfología, es el *MDE* (Schürch et al. 2011) (Prokop y Panholzer 2009) (Lenda et al. 2016) (Chaplot et al. 2006). Generalmente los programas de SIG trabajan con archivos ráster para el análisis de geoprocésamiento; por lo que la nube de puntos tiene que ser transformada en un *MDE* para obtener una malla regular. En este proceso es necesaria

una interpolación numérica (figura 1).

El uso de métodos de interpolación para obtener *MDE*, es decir, mapas ráster continuos a partir de mediciones discretas en algunos puntos, tiene aplicación en muchos campos. La calidad y fiabilidad del *MDE* es fundamental para obtener los resultados más precisos en aplicaciones científico-técnicas relacionadas con la superficie del terreno, como son las aplicaciones geomorfológicas, la detección de desprendimientos de rocas y los modelos de escorrentía-erosión.

La calidad de estos modelos ha cobrado importancia en numerosos análisis: radiación solar global diaria (Jeong et al. 2017), hidrología (Andes y Cox 2017) (Anderson et al. 2006), dispersión de contaminantes (Elumalai et al. 2017), aplicaciones forestales (Montealegre, Lamelas, y De la Riva 2015), estudio de ambientes fluviales y morfología de ríos (Heritage et al. 2009) (Brasington, Vericat, y Rychkov 2012) y, por supuesto, fenómenos y eventos geomorfológicos (Kociuba, Kubisz, y Zagórski 2014) (Domínguez-Cuesta, Jiménez-Sánchez, y Berrezueta 2007). Entre ellos, queremos centrarnos en eventos locales como desprendimientos de rocas y flujos de detritos, que son menos amplios que otros como los deslizamientos. Los datos sobre el terreno se utilizan para entender y analizar los procesos que han dado lugar al cambio morfológico.

En la mayor parte de la literatura, se discuten las técnicas de captura de datos y cómo obtener nubes de puntos densas. Luego, para el análisis de la caracterización del terreno esas nubes de puntos se convierten en un archivo cuadrículado (Wang et al. 2019) (James et al. 2017) (Javernick, Brasington, y Caruso 2014), pero no se menciona, en general, cuál es el método de interpolación utilizado en este paso, información esencial para evitar errores en el análisis multitemporal (Li et al. 2020) como los cambios

posteriores a un fenómeno o por la propia dinámica, como la erosión producida por un río en su curso normal. En las últimas décadas, con los *MDE* proporcionados por las instituciones oficiales en archivos de malla han aparecido las propuestas de relleno de huecos y reconstrucción de superficies. Por ejemplo, el método de *inpainting* proporciona buenos resultados (Crema et al., 2020) (Ayhan et al., 2020). Sin embargo, estos no son el objetivo de nuestra investiga-

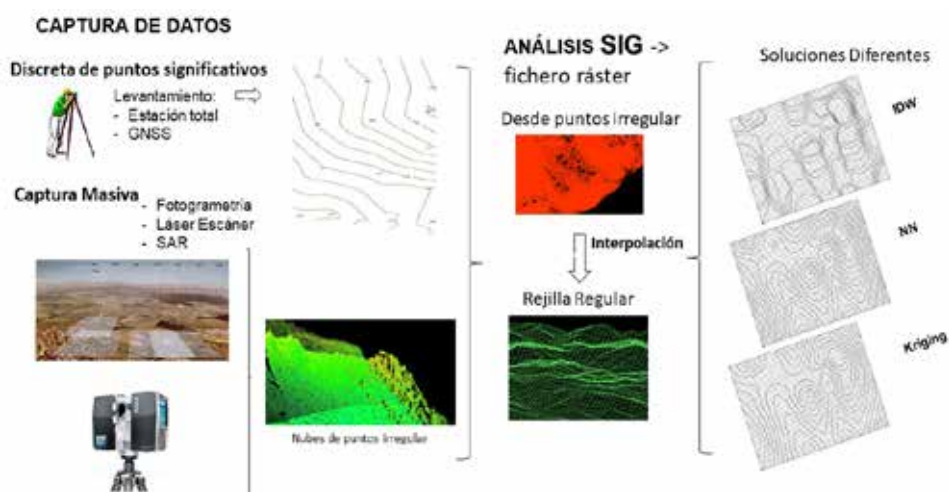


Figura 1. Flujo de trabajo para obtener el MDE a partir de un levantamiento clásico o de sistemas de captura masiva.

ción, que se centra en la generación de *MDE* a partir de datos irregulares.

Se han realizado algunos estudios que demuestran que la calidad de los resultados en el análisis geomorfológico depende de la resolución del ráster que se crea, del método de interpolación que se utiliza (Ashraf, Hur, y Park 2017)(Lenda et al. 2016)(Montealegre et al. 2015)(Zhang y Kovacs 2012), de la resolución de los datos originales y de los parámetros de variabilidad del terreno, como la pendiente y la rugosidad (Li et al., 1992) (Crema et al., 2020). Estos análisis cubren amplias zonas mientras que, para estudiar la influencia en eventos como desprendimientos de rocas y pequeños flujos de escombros, la zona suele ser más pequeña. Además, son necesarios datos con alta resolución para cubrir los detalles del cambio de rugosidad en las zonas de depósito debido a los bloques. El primer objetivo de este trabajo es estudiar la influencia de los métodos de interpolación y de otros parámetros, como la densidad de la nube de puntos y la morfología del terreno (superficie lisa, ondulada o rugosa) en la precisión del *MDE*. Se compararán los métodos de distancia inversa ponderada (*IDW*), *kriging* (*k*), vecino natural (*NN*) y triangulación de malla irregular (*TIN*), por ser de los métodos más extendidos y usados desde hace tiempo. Los resultados muestran que la precisión aumenta con la densidad de la nube de puntos y que, para una densidad determinada, el método de interpolación puede influir.

Por otra parte, al calcular los cambios multitemporales, se suelen tener en cuenta parámetros como la resolución de la nube de puntos, pero no el método de interpolación. En este trabajo comprobaremos cómo el uso de modelos obtenidos con diferentes métodos de interpolación puede introducir un cambio no real significativo en las comparaciones multitemporales. El uso de uno u otro método, en la generación de ficheros para el cálculo de los cambios de volumen en el terreno, puede dar lugar a diferencias importantes en zonas de extensión relativamente pequeña en términos geomorfológicos.

En el apartado 2 describimos los métodos de interpolación objetivo de este estudio y los datos utilizados para su evaluación. En la sección 3 analizamos la calidad del *MDE* obtenido mediante diferentes métodos de interpolación, a partir de varias nubes de puntos reducidas, evaluándolas en un conjunto de puntos de control. Además, describimos la influencia del método de interpolación en un análisis multitemporal del cambio del terreno. En la sección 4 se discuten los resultados y se relacionan con los estudios de otros autores. Finalmente, hay una sección de conclusiones y recomendaciones.

2. MÉTODO Y DATOS (MATERIAL)

2.1. Métodos de interpolación espacial

Los métodos de interpolación espacial se basan en la premisa de que los puntos más cercanos tienen una mayor influencia que los más lejanos. Sin embargo, la forma de considerar esto difiere de un método a otro. Los métodos de interpolación pueden clasificarse en función de varios parámetros, aunque en general podemos distinguir dos grupos principales. Los métodos locales se basan en el cálculo de un punto desconocido a partir de los valores de los píxeles de la vecindad, como la distancia inversa ponderada (*IDW*) y el vecino natural (*NN*), mientras que los métodos globales consideran la tendencia general, como el *kriging* (*K*). En geomorfología, la elección de un método u otro depende a menudo de la aplicación y de la naturaleza de los datos. Se ha estudiado por varios autores, pero no hay una conclusión clara sobre cuál es la mejor opción para cada tipo de terreno (Chaplot et al. 2006) (Kociuba et al. 2014) (Wheaton et al. 2010).

Los métodos de interpolación que se utilizan tradicionalmente en el *software SIG* para generar *MDE* incluyen: ponderación inversa de la distancia (*IDW*), *kriging* (*K*), vecino natural (*NN*) y red irregular de triangulación (*TIN*). El método *TIN* es el más utilizado cuando la muestra de datos es pequeña y discreta, normalmente para generar curvas de nivel, ya que permite recoger los cambios bruscos de la topografía (Goff y Nordfjord 2008) (Hejmanowska 2007). El método *NN* se utiliza habitualmente cuando se trabaja con una mayor densidad de puntos. Se basa en la construcción de polígonos de *Voronoi* y en la triangulación de *Delaunay*. El valor en una localización es una función del peso medio de los valores en los vecinos naturales (Sibson 1981), Ec. (1):

$$\hat{z} = \sum_{i=1}^n w_i z_i \quad (1)$$

donde *z* es la elevación estimada, *n* es el número de vecinos más cercanos, *z_i* son los valores de elevación conocidos y *w_i* es el peso, que está relacionado con el área definida por los polígonos de *Voronoi*. Este método funciona igualmente bien tanto si los datos originales son regulares como irregulares. El método *IDW*, con diferentes posibilidades de dar peso a la distancia es, junto con el del vecino más cercano, uno de los métodos más utilizados para datos densos. La interpolación *IDW* con *w=1* es similar a la *TIN* en terrenos suaves. Su premisa es que los puntos cercanos son más parecidos que los que están alejados, por lo que los puntos más

cercanos a la ubicación de la predicción tienen más peso que los lejanos, véase la ecuación (2).

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{d_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}} \quad (2)$$

La altura, z , en un punto se calcula a partir de z_i y la distancia d_i a los puntos conocidos. Un problema del *IDW* es que la superficie resultante es más suave que la real en valles y elevaciones (Ries 1993) (Li y Heap 2008). Por último, el método de *kriging* que consideramos, debido a las características de la variable que tratamos, la elevación, es el de punto ordinario con semivariograma lineal. El estimador \hat{z} de z se calcula mediante una expresión lineal del tipo mostrado en la ecuación (1). En este caso, los pesos w_i se calculan bajo la condición de que la varianza de $|z - \hat{z}|$ debe ser mínima, pero se establece una distancia por encima de la cual se considera que los datos no están correlacionados y, por tanto, no se utiliza la información de estos puntos en la interpolación. Se basa en la teoría de la variable regionalizada que asume que la variación espacial del fenómeno representado por los valores z es estadísticamente homogénea en toda la superficie (Guo et al. 2013).

La dependencia de la estimación de la elevación en un punto, en función de su entorno, se establece midiendo la semivarianza entre datos separados por diferentes distancias. La función que relaciona la semivarianza con la distancia h se denomina semivariograma y muestra la variación de la correlación entre los datos en función de la distancia. La expresión más común para representarlo es (Oliver y Webster 1990):

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2n_h} \sum_{i=1}^{n_h} (z_{p_i} - z_{p_i+h})^2 \quad (3)$$

Donde n es el número de pares de valores separados por una distancia h . Cambiando este último valor, se puede crear el semivariograma empírico para la zona de trabajo específica. Así, se establece el número de puntos del entorno que se utilizan en la interpolación. Una de las ventajas de este método es que, además de estimar la elevación en un punto, podemos obtener una estimación de su error. Como inconvenientes en la construcción del *MDE*, la teoría requiere que el semivariograma, utilizado en el cálculo de las ponderaciones, tenga validez general para toda el área del *MDE*. Esto significa que la interdependencia entre los datos debe ser exclusivamente una función de la distancia entre

ellos, si la variación de z es homogénea, lo que no ocurre en terrenos quebrados.

2.2. Datos

Para las pruebas se seleccionaron tres zonas (figura 2): plana, ondulada y abrupta. Todas ellas corresponden a la vertiente norte de la Pala de Morrano, en el Parque Nacional de Aigüestortes y Estany de Sant Maurici (Catalunya, España), con una superficie aproximada de 1 km² y un desnivel de casi 200 m (figura 3). La topografía de esta zona en el valle de Dellui está constituida por roca grano-diorítica y presenta un gran volumen de desprendimientos rocosos movilizados. Las zonas presentan no sólo variaciones de pendiente sino también una distribución espacial de la rugosidad muy diferente, tabla 1.

El modelo fotogramétrico se obtuvo mediante fotogrametría aérea desde un hexacóptero puesto que

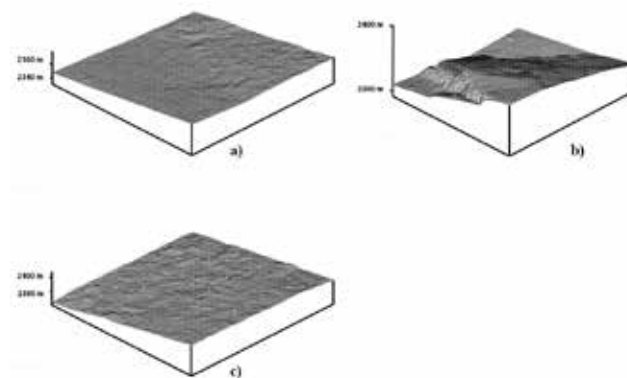


Figura 2. Zonas de estudio (50 x 50 m), a) terreno plano, de pendiente suave y accidentado, b) terreno variable ondulado-montañoso, c) terreno plano, de pendiente moderada y accidentado.

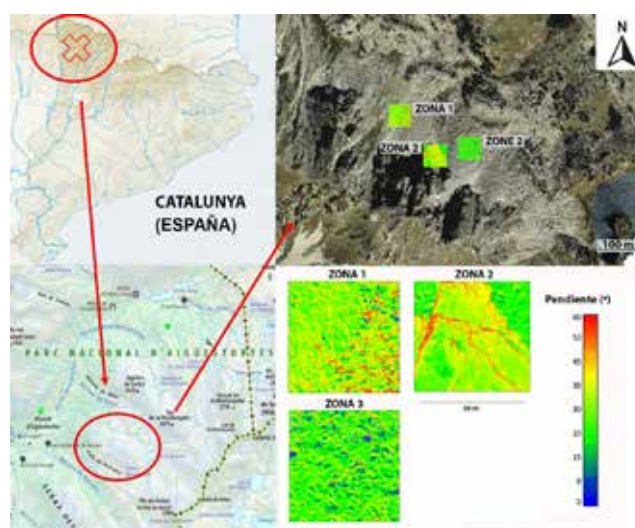


Figura 3. Distribución de las áreas de estudio en la zona de Pala de Morrano. En la parte inferior derecha los mapas de pendientes muestran el terreno abrupto de la zona 2.

Tabla 1. Número de puntos en la nube de puntos original, nivel máximo y mínimo y pendiente en cada área de estudio.

	Resolución media (cm)	nº puntos	Altura máx. (m)	Altura mín. (m)	Pendiente media (°)
zona 1	11	190091	2375,84	2332,42	12,4
zona 2	6	748948	2452,21	2374,19	32,9
zona 3	8	404711	2407,19	2363,04	25,3

la captura terrestre y el uso del escáner láser terrestre (*TLS*) no pueden cubrir toda la superficie. Fue necesario utilizar *RPAS* para capturar imágenes a muy corta distancia del macizo en terrenos de difícil o imposible acceso.

La cobertura fotográfica se realizó de modo que la resolución y el solapamiento se mantuvieran constantes en toda la zona. El solapamiento longitudinal se encuentra entre el 60 y el 90%, y el transversal entre el 20 y el 50%. Para la georreferenciación se utilizaron 8 puntos de control en *3D*, obteniendo un error medio de 0,08 m.

La tabla 1 muestra algunas de las características de estas zonas en cuanto al número de puntos de la nube de puntos original, la elevación máxima y mínima, y la media y mediana de la pendiente. Todas las zonas tienen dimensiones de 50 x 50 m (figura 3). La distancia entre puntos varía entre 6 y 11 cm, y es similar para todos los parches. La mayor densidad se localiza donde la superficie es más variable y tiene mayor pendiente.

La tabla 1 muestra la variabilidad en los valores de pendiente de las superficies, así como el valor medio encontrado para cada zona. Para el cálculo de la pendiente se eligió el plano centrado en cada punto ya que es un modelo robusto con respecto al ruido, aunque es impreciso en los bordes de la zona. La normal a la superficie se calculó estimando la superficie local representada por el punto y sus vecinos. El modelo de superficie local que se eligió fue el plano con un área de influencia de 0,75 m. El proceso de extracción de los vecinos se basó en una estructura *Octree*. La orientación de la normal (es decir, si apunta fuera o dentro del objeto) se determinó a partir de un árbol de expansión mínimo de $knn = 6$ (k -vecino más cercano). La experiencia muestra que los valores más altos reducen el efecto del ruido en la definición de la normal, aunque en las zonas contiguas los valores son similares.

3. CALIDAD DEL MDE

Los principales factores que influyen en la calidad de un *MDE* son: la rugosidad de la superficie; el méto-

do de interpolación; y la precisión, densidad y distribución de los datos (Li 1991). Según (Ley 1986) uno de los cuatro enfoques posibles para determinar la precisión vertical de un *MDE* consiste en la evaluación por prueba de diagnóstico. Es decir, cuando se han obtenido los datos para crear el modelo, se mide la altura en un conjunto de puntos que sirven para controlar la calidad. Esta tarea se realiza tanto al final del proceso como en varias fases intermedias.

Para ello, es necesario establecer dos condiciones: el número mínimo de puntos a utilizar y la ubicación de estos puntos.

Como se establece en Li (1991), el número de puntos para un nivel de confianza del 95 % viene dado por la ecuación (4):

$$n = 1.96^2 \left(\frac{\sigma}{S} \right)^2 \quad (4)$$

Donde σ es la desviación estándar estimada y S es el grado de precisión especificado para la media estimada. Según Li et al. (2005), $\sigma = 100$ y $S = 10$. Por lo tanto

$$n = 1.96^2 \left(\frac{100}{10} \right)^2 = 384 \quad (5)$$

Así, para la validación de la interpolación, se seleccionó una muestra aleatoria de 400 puntos de la nube de puntos inicial en cada zona.

Para analizar la influencia del método de interpolación relacionado con la resolución en la calidad del *MDE*, seguiremos el procedimiento descrito en la figura 4. Como se ha mencionado anteriormente, para cada zona se diezmó la nube de puntos a 0,2 m, 0,5 m, 1 m y 2 m de distancia, a fin de simular una captura realizada con estas resoluciones. Por lo tanto, se mantiene la distribución irregular de los puntos. Después, utilizando los métodos *TIN*, *IDW*, *NN*, *K* creamos una malla regular con un tamaño de celda de 1 m.

La interpolación se llevó a cabo utilizando el *software Surfer v.11* para todos los métodos. En una primera aproximación utilizamos el *software ArcGIS 10.5*

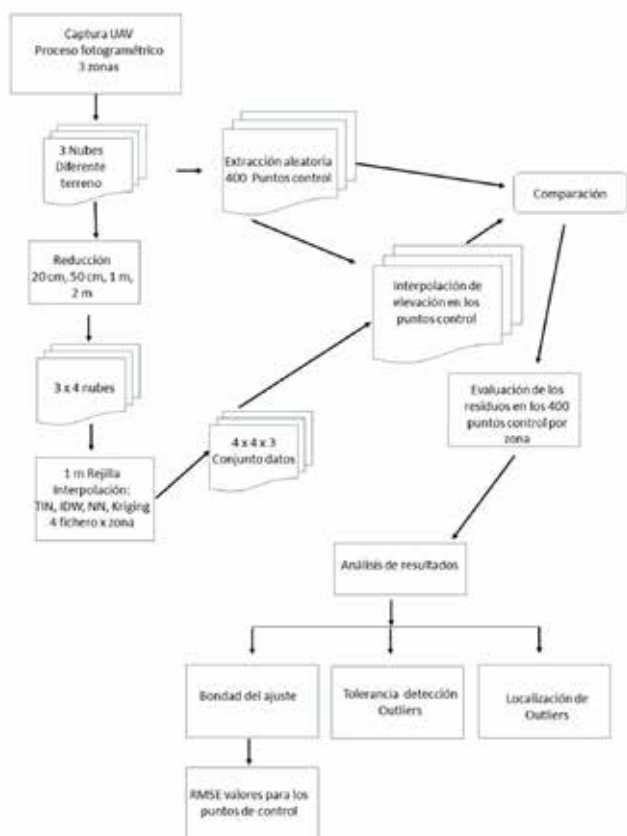


Figura 4. Diagrama de flujo del proceso de análisis.

pero el tiempo de computación para algunos de los procesos aumentó drásticamente, casi triplicando el tiempo con *Surfer*, por lo que se descartó. Los parámetros utilizados para cada método son:

- *K*: lineal, sin transformación y sin tendencia considerada en el cálculo del semivariograma. Sin anisotropía.
- *IDW*: exponente de potencia 2. Sin anisotropía, sin suavizado.
- *NN*, *TIN*: sin anisotropía, sin parámetros.

Figura 4. Diagrama de flujo del proceso de análisis.

La comparación se restringe a la resolución de 1 m, ya que la distancia media entre puntos de las observaciones de superficie es insuficiente para justificar interpolaciones a resoluciones mayores (Brasington et al. 2012). Para comprobar la calidad de la malla obtenida se han utilizado los 400 puntos de control seleccionados al azar. A partir del conjunto de diferencias, entre la altura del punto de control y el modelo, se analizará la precisión de cada modelo según el método de interpolación utilizado. Siguiendo los criterios clásicos de detección de valores atípicos de forma más restrictiva, rechazamos aquellos puntos de control cuyo valor del incremento de altura difiere de la mediana en más de 1,5 veces el rango intercuartil. En este pro-

ceso, aparecen dos nuevos parámetros a considerar en nuestro análisis: el radio del intervalo a partir del cual se rechazan los puntos interpolados, a un radio menor le corresponde mayor precisión, y el número de puntos interpolados, en cada caso, para un radio predeterminado de 30 cm. Hemos fijado este radio límite como umbral de la zona más suave y del paso de malla más fino, ya que representan las condiciones para las que, a priori, se obtendrá una mayor calidad porque permitirá el análisis más homogéneo en todos los casos. También será objeto de estudio la situación de los puntos descartados. Para detectar posibles casos de mala funcionalidad, se realiza un test de normalidad. Por último, se calcula el error cuadrático medio (*RMSE*), Ec. (6), de cada muestra seleccionada se calcula.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_{ri} - z_{pi})^2}{n}} \quad (6)$$

donde n es el número de puntos, 400 en este caso, z_{pi} es la elevación obtenida por interpolación en el modelo y z_{ri} es la elevación real obtenida directamente de la nube de puntos original. Este parámetro es ampliamente utilizado en la validación de *MDE* (Aguilar et al. 2005) (Guo et al. 2013). Debemos precisar que estamos hablando de elevación real cuando, en realidad, estará afectada por los errores de captura y referenciación de los datos fotogramétricos. Sin embargo, en este caso, vamos a dejarlos de lado, ya que el objetivo es evaluar los métodos de interpolación.

3.1. Resultados

Como hemos mencionado anteriormente, para evaluar los métodos de interpolación en diferentes muestras y para diferentes resoluciones, consideramos dos tipos de parámetros. Uno relacionado con la usabilidad de la malla resultante, como el número de puntos que se pueden interpolar para la comparación con los puntos de control, y el otro, como el *RMSE*, relacionado con la precisión de dicha malla. Además, evaluamos la influencia del método de interpolación en el cálculo del cambio de volumen en el análisis multitemporal.

3.1.1. Número de puntos interpolados con éxito en los archivos ráster

Una vez calculadas las rejillas regulares de 1m de paso en cada nube de puntos, se obtiene la altura en estos modelos regulares para los 400 puntos de control mediante el método bilineal entre los nodos de la cuadrícula. En la figura 5, podemos observar que el número de puntos interpolados en cada rejilla depende de la resolución de la nube de puntos a partir de

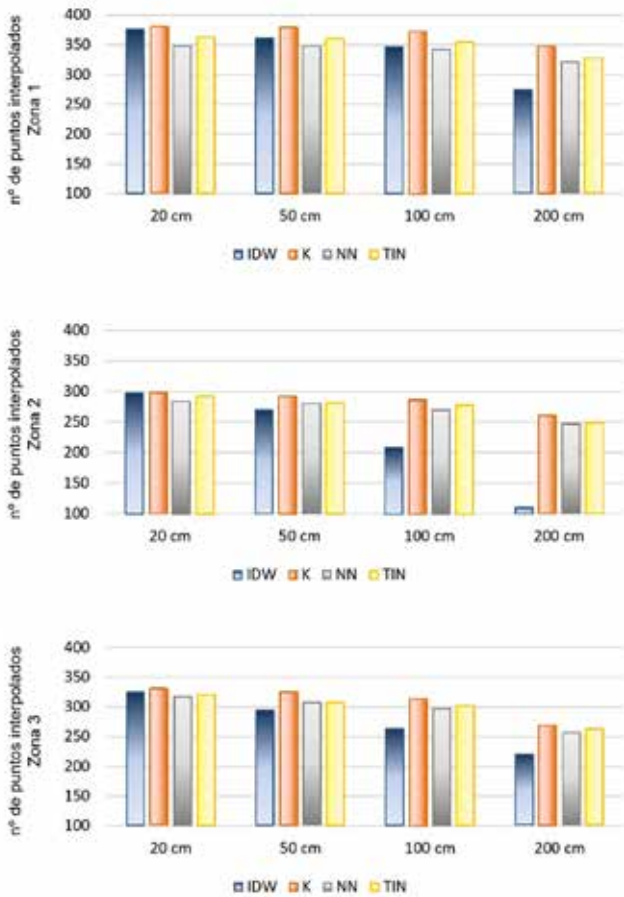


Figura 5. Número de puntos interpolados en cada zona respecto a la resolución de la nube original

la cual se ha calculado esta, pero también del método utilizado en la interpolación.

La figura 5 muestra que, independientemente de la zona (1-3) y de la resolución inicial de la nube de puntos, el número de puntos interpolados es mejor para los métodos *IDW* y *K*, mientras que para los métodos *NN* y *TIN* se puede perder hasta un 8 % de los puntos en el proceso. Esto se debe a que en los métodos *NN* y *TIN*, la interpolación se realiza considerando únicamente el límite establecido por los puntos de muestra, sin sobrepasarlos.

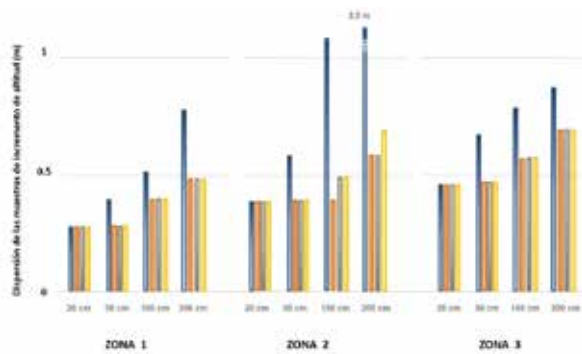


Figura 6. Dispersión de las muestras de incremento de altitud $\{\Delta z_i\}$

3.1.2. Validación de los puntos interpolados

Una vez interpolados la mayoría de los 400 puntos de control de las 3 zonas, para cada una de las 4 rejillas y por los 4 métodos, se obtienen 3 zonas \times 4 resoluciones \times 4 métodos de interpolación = 48 casos para los que se calculan las diferencias de altitud $\{\Delta z_i\}$ entre la cota original y la interpolada. La tendencia central, tanto si se calcula la media como la mediana, es prácticamente cero en todos los casos. La igualdad entre la media y la mediana es un indicador de la distribución simétrica de esta variable. Su dispersión será un indicador de la bondad de la interpolación en el sentido de que, en una buena interpolación, no debe haber muchos puntos que se alejen del valor central. La figura 6 muestra la dispersión de Δz_i indicada por el valor de $1,5R$, donde R es el rango intercuartil para los cuatro métodos de interpolación y para cada una de las cuatro resoluciones, en cada una de las 3 zonas. En la figura 6 el máximo se alcanza en la zona 2, resolución 2 m, con el método *IDW* con un valor aproximado de 2,5 m, pero para mantener la escala en la figura, se ha cortado la barra vertical, y se ha reflejado el valor.

Podemos observar que, en una zona dada y para una resolución determinada, las diferencias de cotas en la muestra de dispersión no dependen significativamente del método de interpolación, excepto para el método *IDW*, que se comporta peor en todas las zonas para resoluciones a partir de 0,5 m. En las tres zonas, este parámetro tiende a aumentar cuando disminuye la resolución de la nube de puntos sobre la que se ha construido la malla.

Una vez evaluada la dispersión resultante en las interpolaciones, proponemos seleccionar los puntos «válidos» siguiendo el criterio de que se rechazarán los puntos cuya diferencia de altitud en valor absoluto, $|\Delta z_i|$, sea superior a 30 cm. Como hemos visto en el apartado anterior, este valor es igual a 1,5 veces el rango intercuartil en la zona 1 y para la mayor densidad.

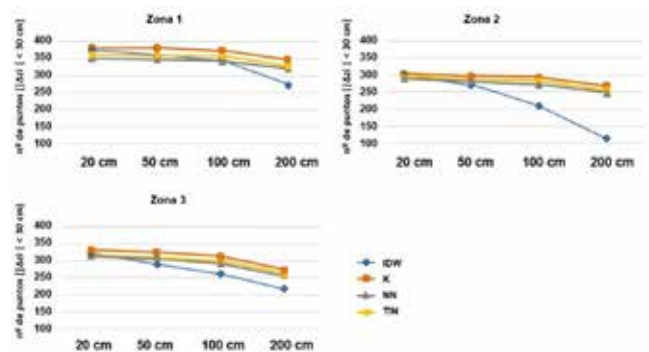


Figura 7. Número de puntos seleccionados para todas las zonas, métodos y resoluciones

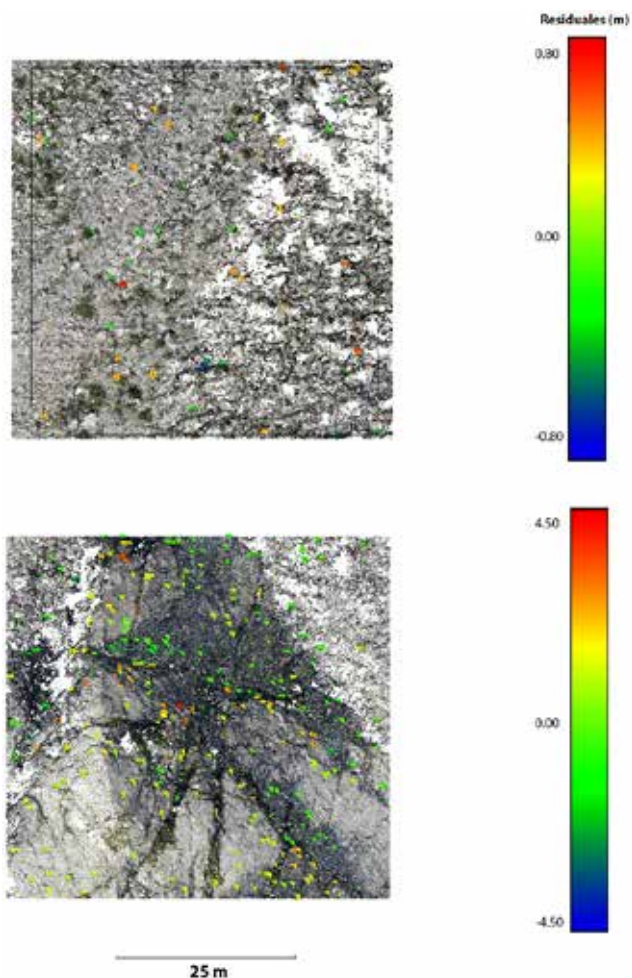


Figura 8. Puntos descartados, a) zona 2, abajo, con interpolación TIN y b) zona 3, arriba, con interpolación IDW. La nube de puntos original se muestra como fondo con color.

Hemos querido ser un poco más estrictos que en la detección clásica de *outliers*. Así, la muestra de puntos rechazados será más numerosa y mejor para el estudio de su situación en cada zona. La figura 7 muestra el número de puntos seleccionados para todas las zonas, métodos y resoluciones.

Para cada zona y método, el número de puntos seleccionados disminuye con la densidad de la nube

de puntos sobre la que se ha calculado la cuadrícula. Sin embargo, cuando se han establecido una zona y una densidad, el método *K* destaca ligeramente en cuanto al número de puntos seleccionados.

La figura 8 muestra los puntos descartados simbolizados respecto a sus residuos en una escala de colores que va del azul (mínimo -80 cm) al rojo (máximo 80 cm) sobre la nube de puntos en gris. La mayoría de los puntos rechazados se encuentran en los límites de las zonas de estudio y en los cambios de pendiente. En algunos casos, especialmente cuando se trabaja con las cuadrículas interpoladas a partir de una mayor densidad de puntos, estos puntos pueden detectarse en zonas donde no se ha eliminado la vegetación.

Hemos destacado dos casos: la figura 8 a) muestra los puntos descartados en el mejor caso, correspondiente al método *TIN* y una resolución inicial de 20 cm. En ella, los residuos se distribuyen de forma homogénea con un valor máximo de aproximadamente 80 cm en valores absolutos. La figura 8 b), muestra la interpolación mediante el *IDW* en la zona 3, que corresponde al peor de los casos, los residuos alcanzan un máximo de aproximadamente 4,5 m en valores absolutos. Estos valores se pueden explicar porque en esta zona es donde se producen más cambios de rugosidad debido a la existencia de bloques.

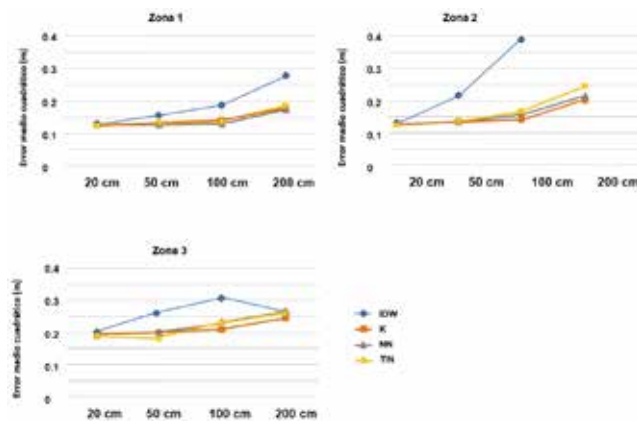


Figura 9. Error medio cuadrático para cada método de interpolación y zona.

Tabla 2. Resultados del test de normalidad para las 3 zonas.

	P-valor Zona 1				P-valor Zona 2				P-valor Zona 3			
	0,2 m	0,5 m	1 m	2 m	0,2 m	0,5 m	1 m	2 m	0,2 m	0,5 m	1 m	2 m
IDW	0,70	0,85	0,88	0,67	0,19	0,00	0,01	0,11	0,35	0,21	0,69	0,55
K	0,59	0,11	0,22	0,12	0,14	0,03	0,03	0,17	0,84	0,39	0,88	0,86
NN	0,28	0,67	0,81	0,28	0,06	0,01	0,01	0,00	0,48	0,8	0,97	0,48
TIN	0,20	0,62	0,94	0,30	0,39	0,04	0,00	0,01	0,37	0,42	0,51	0,92

3.1.3. Test de normalidad y error medio cuadrático

Una vez rechazados los puntos con mayor dispersión, proponemos estudiar la distribución de la variable Δz_i en los puntos seleccionados. Como ya hemos señalado, la igualdad entre la media y la mediana indica una distribución simétrica. Ahora comprobaremos si alguno de los métodos de interpolación produce una distribución de esta variable que se aleje de la normalidad. La muestra se divide en diez intervalos de clase y se aplica una prueba de bondad de ajuste a una distribución normal. Como debemos estimar los dos parámetros de la ley normal, el estadístico de contraste sigue una ley χ^2 con 7 grados de libertad. Un *P*-valor más alto corresponderá a una muestra más normal. Los resultados se presentan en la Tabla 2.

En las zonas suaves 1 y 3, que no presentan irregularidades notables, las diferencias de altitud se distribuyen de forma normal para todos los métodos de interpolación y todas las resoluciones, como podemos esperar según Li et al. (2005). Sin embargo, en la zona irregular 2, la prueba de normalidad puede considerarse negativa,

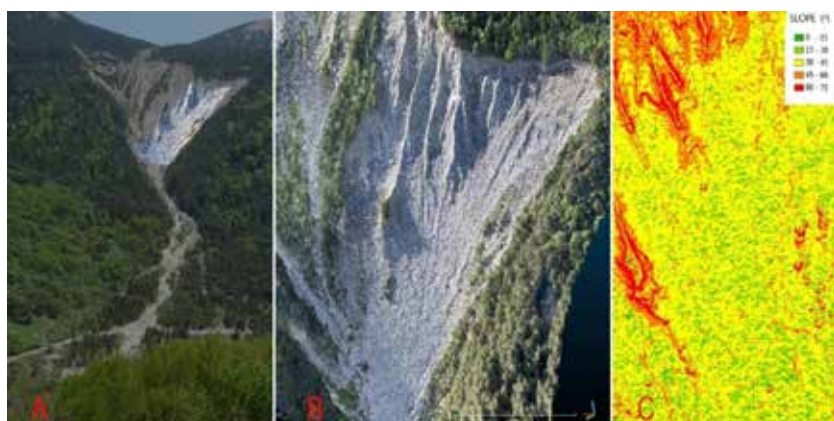


Figura 10. a) Área de estudio de los métodos de interpolación, b) Nube de puntos con información fotográfica del modelo UAV, c) Mapa de ángulos de pendiente del MDE ráster 2x2 m

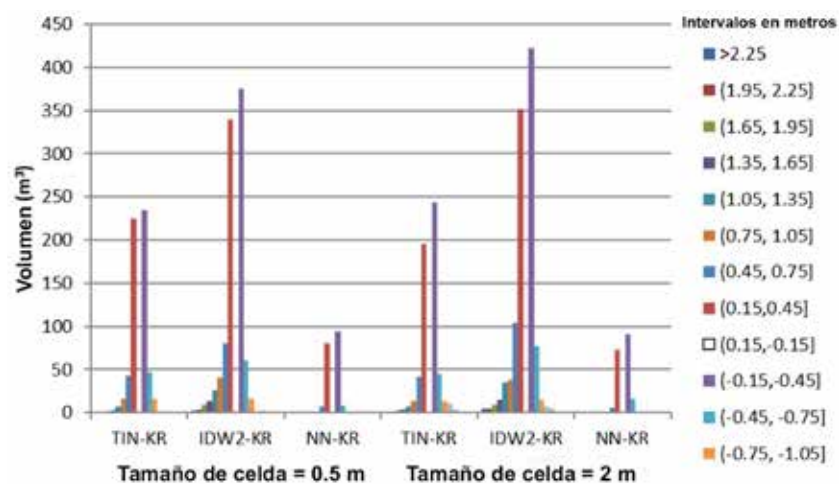


Figura 11. Comparación de métodos de interpolación. Intervalos en metros.

incluso para baja significación, a partir de una resolución de la nube de puntos de 0,5 m.

Otro parámetro que se ha estudiado en las muestras de puntos seleccionados es el error medio cuadrático (*RMSE*). Un valor más bajo para este parámetro corresponderá a una mejor interpolación. Los siguientes gráficos muestran los resultados para las 3 zonas, los 4 métodos de interpolación y las 4 resoluciones (figura 9).

Vemos que los errores medios cuadráticos tienden a aumentar ligeramente cuando la resolución de la nube de puntos disminuye. En lo que respecta al método de interpolación, este parámetro tiene valores más altos en el método *IDW* a partir de una resolución de 0.5 m.

3.1.4. Influencia del método de interpolación en cálculos volumétricos

El método más común para comparar *MDE* y calcular los volúmenes de erosión / acumulación de procesos geomorfológicos consiste en superponer archivos ráster en un *SIG*. En esta tarea, las nubes de puntos iniciales deben transformarse en archivos ráster, lo que generalmente conduce a una pérdida de información y una reducción de la calidad. Como hemos visto anteriormente, este proceso implica un método de interpolación. Para estudiar su influencia, se seleccionó un área de prueba de la nube de puntos creada a partir de un vuelo *RPAS*, con una superficie de 28 800 m² (120 m x 240 m) y situada en la parte superior de una zona escarpada abierta, donde están presentes todos los rasgos morfológicos típicos como arroyos, grandes bloques y pendientes pronunciadas (figura 10).

Los archivos ráster se crearon mediante los cuatro métodos de interpolación analizados en las secciones anteriores (*K*, *TIN*, *NN* e *IDW*), utilizando un tamaño de celda de 0,5 m y 2,0 m. La calidad de los archivos ráster resultantes se analizó mediante comparaciones cuantitativas, calculando las diferencias de volumen (Tabla 3). Usamos el ráster, interpolado mediante *kriging*, como modelo del terreno porque es el método que, a priori, en nuestro caso, ofrece resultados más realistas ya que se dispone de nubes de puntos muy densas. A partir de esta referencia, se calcularon las diferencias en elevación y volumen (figura 11).

El nivel de detalle (*LoD*) se estableció, de la forma más sencilla y directa (*Whea-*

Tabla 3. Evaluación cuantitativa de diferencias entre los archivos ráster obtenidos por IDW, NN y TIN, tomando K como modelo de referencia. Cuadrícula de 2 m y 0.5 m. Volumen entre superficies considerando todos los datos y los datos filtrados.

Intervalos (m)	S=0,5 m						S=2 m					
	TIN-K		IDW-K		NN-K		TIN-K		IDW-K		NN-K	
	n° de celdas	Vol. (m³)	n° de celdas	Vol. (m³)	n° de celdas	Vol. (m³)	n° de celdas	Vol. (m³)	n° de celdas	Vol. (m³)	n° de celdas	Vol. (m³)
>2,25	8	0,60	28	2,10	0	0,00	1	1,20	4	4,80	0	0,00
(1,95. 2,25]	3	0,20	52	3,90	0	0,00	0	0,00	4	4,80	0	0,00
(1,65. 1,95]	10	0,75	122	9,15	0	0,00	2	2,40	8	9,60	0	0,00
(1,35. 1,65]	30	2,25	188	14,10	0	0,00	3	3,60	12	14,40	0	0,00
(1,05. 1,35]	95	7,12	348	26,10	0	0,00	6	7,20	29	34,80	0	0,00
(0,75. 1,05]	212	15,90	539	40,42	9	0,67	11	13,20	32	38,40	0	0,00
(0,45. 0,75]	570	42,75	1070	80,25	88	6,60	35	42,00	87	104,40	5	6,00
(0,15.0,45]	2996	224,70	4534	340,05	1072	80,40	163	195,60	293	351,60	61	73,20
(-0,15.-0,45]	3133	234,97	4999	374,92	1255	94,12	203	243,60	352	422,40	76	91,20
(-0,45.-0,75]	623	46,72	813	60,97	108	8,10	37	44,40	64	76,80	13	15,60
(-0,75.-1,05]	218	16,35	217	16,27	16	1,20	11	13,20	12	14,40	0	0,00
(-1,05.-1,35]	0	0,00	1	0,07	0	0,00	9	10,80	6	7,20	0	0,00
(-1,35.-1,65]	24	1,80	36	2,70	1	0,07	3	3,60	4	4,80	0	0,00
(-1,65.-1,95]	14	1,05	19	1,42	0	0,00	0	0,00	1	1,20	0	0,00
(-1,95.-2,25]	4	0,30	7	0,52	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
< -2,25	3	0,22	10	0,75	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
TOTAL		595,72		973,72		191,15		580,80		1089,6		186,00

ton et al. 2010), como el componente cuadrático del error en cada uno de los modelos.

$$\sigma_{dif} = \sqrt{\sigma_{DEM_new}^2 + \sigma_{DEM_old}^2}$$

Los cambios no se consideran significativos si las discrepancias entre ambos no superan el LoD. Teniendo en cuenta la desviación estándar de los modelos fotogramétricos 3D valorados, ésta se establece en 15 cm. Se considera esta discrepancia comparable al ruido y no se contabiliza como volumen ganado o perdido. Por tanto, no se muestran los intervalos centrales entre [0, 0,15) y [-0,15, 0).

Las diferencias para tres comparaciones se representan mediante histogramas de las diferencias de elevación en las celdas ráster (figura 11). Los resultados muestran que la mayoría de las celdas tienen una pequeña variación de elevación de $\pm 0,15$ m, pero la

diferencia de volumen final es grande cuando sumamos todas las celdas.

Independientemente del tamaño de la celda, el método IDW tiene los valores más discrepantes, seguido del TIN. Estos valores extremos se dan principalmente en presencia de bloques o en áreas de mayor pendiente cerca de las crestas de los barrancos, ya que estos métodos, como ya se mencionó, tienen un efecto suavizante. Las diferencias entre NN y K son las más pequeñas. Así, para las zonas donde se dispone de una alta densidad de puntos, el primero se puede utilizar con total garantía, aunque el tiempo de cálculo sea más corto. En cualquier caso, si utilizamos cuadrículas de diferentes interpolaciones, podemos obtener diferencias absolutas en volúmenes cercanos a los 1000 m³, un depósito sobreestimado de aproximadamente 550 m³ y una erosión de 450-530 m³, dependiendo de la resolución de la cuadrícula, independientemente de lo que ocurra en el campo.

4. DISCUSIÓN

Como ya hemos comentado, existen múltiples estudios sobre métodos de interpolación, pero ninguno de ellos arroja conclusiones claras sobre la idoneidad de un método sobre otro, debido a la cantidad de parámetros que intervienen. Algunos (Ali 2004) (Declercq 1996) (Aguilar et al. 2005) muestran que métodos como el *IDW* darían los mejores resultados. En morfología fluvial, por ejemplo, algunos autores encontraron que los *TIN* son más confiables (Butler, Lane y Chandler 1998) (Vallé y Pasternack 2006) (Rumsby et al. 2008), pero algunos otros encontraron que la elección del algoritmo de interpolación no es tan importante como la estrategia de la observacional. Hoy en día, la calidad de los resultados observacionales, tanto los que resultan de técnicas discretas como las capturas masivas, es bastante similar. La diferencia más importante entre las técnicas de captura, con el fin de proporcionar *MDE* con suficiente precisión para diferentes aplicaciones, podría ser la resolución de los datos originales. En nuestro caso, a la vista de los resultados, podemos concluir que el método *kriging* presenta un resultado ligeramente mejor en todos los casos, en teniendo en cuenta terrenos diferentes y diferentes resoluciones originales de la nube de puntos, mientras que el *IDW* tiene los peores resultados. Esto corrobora el resultado mostrado por Zimmerman et al. (1999) en su comparación de *IDW* versus *kriging*, en el que el *kriging* arrojó mejores estimaciones de altitud que *IDW*, independientemente del tipo de relieve y patrón de muestreo.

Para zonas planas, los métodos *TIN*, *NN* y *kriging* tienen valores de *RMSE* similares, aunque para áreas más abruptas, el último método produce mejores resultados. Por otra parte, se ha corroborado que, en la zona de mayor pendiente, el número de puntos que superan el umbral fijado para el incremento de altitud es superior. Hodgson, Michael E. y Bresnahan (2004) estimaron que el error en pendientes superiores a 25° es hasta dos veces superior al correspondiente a áreas prácticamente planas. Esto se puede observar en la zona 2, con una pendiente promedio de 33°, utilizando el método *IDW*.

Asimismo, se ha verificado que, a mayor resolución, mejores resultados, como se explica en (Aguilar et al. 2005) (Hu et al. 2009) (Guo et al. 2013). Esta diferencia en la dependencia de la resolución se aprecia principalmente, en nuestro caso, con el método de interpolación *IDW*, aunque otros autores como Reuter (Reuter et al., 2007) encuentran buenos resultados con el método *IDW* para alta resolución. Cuando los datos

originales provienen de una captura discreta, tradicionalmente se ha utilizado el método *TIN* con líneas de corte, obteniendo buenos resultados. Sin embargo, cuando se parte de nubes densas, con puntos de 20 cm a 2 m, los resultados son similares a las obtenidas con el método de *kriging*, incluso en el costo de cálculo.

Ha quedado claro que el método de interpolación puede afectar al cálculo de cambios geomorfológicos en el análisis multitemporal. En general, se dispone de una cuadrícula para la que se conoce la resolución y el método de captura, pero no el método de interpolación utilizado para generarla. ¿Cómo afectan realmente los diferentes métodos de interpolación en los volúmenes estimados?

En el análisis volumétrico multitemporal, los resultados muestran la importancia del método de interpolación seleccionado durante la creación de modelos ráster. Se recomienda aplicar los mismos métodos de interpolación para todos los modelos durante un estudio. Por tanto, se debe solicitar información detallada sobre este tema respecto a los archivos ráster existentes, antes de utilizarlos para calcular diferencias en elevaciones o volúmenes.

5. CONCLUSIONES

Se ha estudiado la influencia de diferentes factores en la precisión altimétrica de un *MDE*, construido a partir de una nube de puntos obtenida mediante un sistema de captura de datos masivo. Se han considerado las características del terreno, la resolución de la nube de puntos sobre la que se construye el *MDE* y el método de interpolación utilizado. Se han evaluado diversos parámetros, como el error cuadrático medio, la dispersión de las muestras de diferencias de altitud entre puntos de control y puntos interpolados, el umbral de aceptación de puntos considerando estas diferencias de altitud, la normalidad de estas muestras y la diferencia volumétrica entre *MDE* calculados mediante diferentes métodos de interpolación. Todos estos parámetros se han evaluado en los *MDE* construidos para diferentes terrenos, densidades y métodos de interpolación.

Se pueden sacar diferentes conclusiones: La normalidad de las muestras de diferencias de altitud se ve afectada por los cambios de pendiente. La densidad de la nube de puntos influye en la calidad del *MDE* resultante. En la evaluación de todos los parámetros, una mayor densidad permite mejores resultados. En cuanto a los métodos de interpolación, fijada una

densidad, el método *IDW* se comporta peor con respecto a la dispersión de las diferencias de altitud y los errores cuadráticos medios. En la zona más irregular, el método *K* destaca levemente en cuanto al número de puntos seleccionados para un umbral de diferencias de altitud, y en la normalidad de las muestras de estas diferencias. Finalmente, en la comparación volumétrica para diferentes métodos de interpolación, cuando se toma el método *K* como base, el método *NN* da los mejores resultados.

Por tanto, aunque los datos no nos permiten concluir, de forma clara, cuál es el mejor método de interpolación en la construcción de *MDEs*, se puede destacar un resultado importante. Es fundamental conocer el método de interpolación utilizado en la construcción de las redes si se va a realizar un análisis multitemporal pues, si los diferentes modelos se han calculado mediante diferentes métodos de interpolación, podemos concluir que se ha producido un cambio de volumen cuando en realidad se debe al proceso de cálculo.

REFERENCIAS

- Ayhan, B., Kwan, C., Larkin, J., Kwan, L. M., Skarlatos, D. P., & Vlachos, M. (2020). *Performance comparison of different inpainting algorithms for accurate DTM generation*. 17. <https://doi.org/10.1117/12.2557824>
- Crema, S., Llena, M., Calsamiglia, A., Estrany, J., Marchi, L., Vericat, D., & Cavalli, M. (2020). Can inpainting improve digital terrain analysis? Comparing techniques for void filling, surface reconstruction and geomorphometric analyses. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(3), 736–755. <https://doi.org/10.1002/esp.4739>
- Reuter, H. I., Nelson, A., & Jarvis, A. (2007). An evaluation of void-filling interpolation methods for SRTM data. *International Journal of Geographical Information Science*, 21(9), 983–1008. <https://doi.org/10.1080/13658810601169899>
- Aguilar, Fernando J., Francisco Agüera, Manuel a. Aguilar, and Fernando Carvajal. 2005. "Effects of Terrain Morphology, Sampling Density, and Interpolation Methods on Grid DEM Accuracy." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 71(7):805–16.
- Ali, Tarig A. 2004. "On the Selection of an Interpolation Method for Creating a Terrain Model (TM) from LIDAR Data." Pp. 1–18 in *Proceedings of the American Congress on Surveying and Mapping (ACSM) Conference*. Nashville.
- Anderson, Eric S., James A. Thompson, David A. Crouse, and Rob E. Austin. 2006. "Horizontal Resolution and Data Density Effects on Remotely Sensed LIDAR-Based DEM." *Geoderma* 132(3–4):406–15.
- Andes, L. C., and A. L. Cox. 2017. "Rectilinear Inverse Distance Weighting Methodology for Bathymetric Cross-Section Interpolation along the Mississippi River." *Journal of Hydrologic Engineering* 22(7):04017014.
- Ashraf, Imran, Soojung Hur, and Yongwan Park. 2017. "An Investigation of Interpolation Techniques to Generate 2D Intensity Image from LIDAR Data." *IEEE Access* 5(July):8250–60.
- Ayhan B, Kwan C, Larkin J, et al (2020) Performance comparison of different inpainting algorithms for accurate DTM generation. 17. <https://doi.org/10.1117/12.2557824>
- Brasington, J., D. Vericat, and I. Rychkov. 2012. "Modeling River Bed Morphology, Roughness, and Surface Sedimentology Using High Resolution Terrestrial Laser Scanning." *Water Resources Research* 48(11):1–18.
- Butler, J. B., S. N. Lane, and J. H. Chandler. 1998. "Assessment of DEM Quality for Characterizing Surface Roughness Using Close Range Digital Photogrammetry." *Photogrammetric Record* 16(92): 271–91.
- Chaplot, Vincent, Frédéric Darboux, Hocine Bourenane, Sophie Leguëdois, Norbert Silvera, and Konngkeo Phachomphon. 2006. "Accuracy of Interpolation Techniques for the Derivation of Digital Elevation Models in Relation to Landform Types and Data Density." *Geomorphology* 77(1–2):126–41.
- Crema S, Llena M, Calsamiglia A, et al (2020) Can inpainting improve digital terrain analysis? Comparing techniques for void filling, surface reconstruction and geomorphometric analyses. *Earth Surf Process Landforms* 45:736–755. <https://doi.org/10.1002/esp.4739>
- Declercq, Franky Albert Noël. 1996. "Interpolation Methods for Scattered Sample Data: Accuracy, Spatial Patterns, Processing Time." *Cartography and Geographic Information Systems* 23(3):128–44.
- Domínguez-Cuesta, María José, Montserrat Jiménez-Sánchez, and Edgar Berrezueta. 2007. "Landslides in the Central Coalfield (Cantabrian Mountains, NW Spain): Geomorphological Features, Conditioning Factors and Methodological Implications in Susceptibility Assessment." *Geomorphology* 89(3–4):358–69.
- Elumalai, Vetrimerugan, K. Brindha, Bongani Sithole, and Elango Lakshmanan. 2017. "Spatial Interpolation Methods and Geostatistics for Mapping Groundwater Contamination in a Coastal Area." *Environmental Science and Pollution Research*

- 24(12):11601–17.
- Goff, J. A., and S. Nordfjord. 2008. "Interpolation of Fluvial Morphology Using Channel-Oriented Coordinate Transformation: A Case Study from the New Jersey Shelf." *Math. Geol* 36(6):643–58.
- Guo, Qinghua, Wenkai Li, Hong Yu, and Otto Alvarez. 2013. "Effects of Topographic Variability and Lidar Sampling Density on Several DEM Interpolation Methods." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 76(6):701–12.
- Hejmanowska, B. 2007. "Analysis of NMT in the Form of GRID and TIN on Example of Data from OKI. Archives of Photogrammetry." *Cartography and Remote Sensing* 17(a):281–89.
- Heritage, George L., David J. Milan, Andrew R. G. Large, and Ian C. Fuller. 2009. "Influence of Survey Strategy and Interpolation Model on DEM Quality." *Geomorphology* 112(3–4):334–44.
- Hodgson, Michael E. and Bresnahan, Patrick. 2004. "Accuracy of Airborne Lidar-Derived Elevation." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 70(3).
- Hu, P., X. Liu, and H. Hu. 2009. "Accuracy Assessment and of Digital and Elevation and Models Based on Approximation and Theory." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 75(1):49–56.
- James, M. R., and S. Robson. 2012. "Straightforward Reconstruction of 3D Surfaces and Topography with a Camera: Accuracy and Geoscience Application." *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 117(3):1–17.
- James, M. R., S. Robson, S. d'Oleire-Oltmanns, and U. Niethammer. 2017. "Optimising UAV Topographic Surveys Processed with Structure-from-Motion: Ground Control Quality, Quantity and Bundle Adjustment." *Geomorphology* 280:51–66.
- Javernick, L., J. Brasington, and B. Caruso. 2014. "Modeling the Topography of Shallow Braided Rivers Using Structure-from-Motion Photogrammetry." *Geomorphology* 213:166–82.
- Jeong, D. I., A. St-Hilaire, Y. Gratton, C. Bélanger, and C. Saad. 2017. "A Guideline to Select an Estimation Model of Daily Global Solar Radiation between Geostatistical Interpolation and Stochastic Simulation Approaches." *Renewable Energy* 103:70–80.
- Kociuba, Waldemar, Waldemar Kubisz, and Piotr Zagórski. 2014. "Use of Terrestrial Laser Scanning (TLS) for Monitoring and Modelling of Geomorphic Processes and Phenomena at a Small and Medium Spatial Scale in Polar Environment (Scott River - Spitsbergen)." *Geomorphology* 212:84–96.
- Lenda, Grzegorz, Marcin Ligas, Paulina Lewińska, and Anna Szafarczyk. 2016. "The Use of Surface Interpolation Methods for Landslides Monitoring." *KSCE Journal of Civil Engineering* 20:188–96.
- Ley, R. 1986. "Accuracy Assessment of Digital Terrain Models." Pp. 455–64 in *Auto-Carto Londo*.
- Li, J., and A. D. Heap. 2008. *A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists*. edited by G. A. Department of Resources, Energy and Tourism. Canberra.
- Li, Li, Mark A. Nearing, Mary H. Nichols, Viktor O. Polyakov, D. Phillip Guertin, and Michelle L. Cavanaugh. 2020. "The Effects of DEM Interpolation on Quantifying Soil Surface Roughness Using Terrestrial LiDAR." *Soil and Tillage Research* 198(October 2019).
- Li, Zhilin. 1991. "Reliability of DTM Accuracy" *PERS* 57(10):1333–40.
- Montealegre, Antonio Luis, María Teresa Lamelas, and Juan De La Riva. 2015. "Interpolation Routines Assessment in ALS-Derived Digital Elevation Models for Forestry Applications." *Remote Sensing* 7(7):8631–54.
- Oliver, M. A., and R. Webster. 1990. "Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems." *International Journal of Geographical Information Systems* 4(3):313–32.
- Prokop, A., and H. Panholzer. 2009. "Assessing the Capability of Terrestrial Laser Scanning for Monitoring Slow Moving Landslides." *Natural Hazards and Earth System Science* 9(6):1921–28.
- Reuter HI, Nelson A, Jarvis A (2007) An evaluation of void-filling interpolation methods for SRTM data. *Int J Geogr Inf Sci* 21:983–1008. <https://doi.org/10.1080/13658810601169899>
- Ries, L. 1993. "Areas of Influence for IDW-Interpolation with Isotropic Environmental Data." *Catena* 20(1):199–205.
- Rumsby, B. T., J. Brasington, J. A. Langham, S. J. McLelland, R. Middleton, and G. Rollinson. 2008. "Monitoring and Modelling Particle and Reach-Scale Morphological Change in Gravel-Bed Rivers: Applications and Challenges." *Geomorphology* 93(1–2):40–54.
- Schürch, Peter, Alexander L. Densmore, Nicholas J. Rosser, Michael Lim, and Brian W. Mcardell. 2011. "Detection of Surface Change in Complex Topography Using Terrestrial Laser Scanning: Application to the Illgraben Debris-Flow Channel." *Earth Surface Processes and Landforms* 36(14):1847–59.
- Shi WZ, Li QQ, Zhu CQ (2005) Estimating the propagation error of DEM from higher-order interpolation algorithms. *Int J Remote Sens* 26:3069–3084. <https://doi.org/10.1080/01431160500057905>

- Sibson, R. 1981. "A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation." Pp. 21–36 in *Interpolating Multivariate Data*, edited by V. Barnett. New York: John Wiley & Sons.
- To, T., D. Nguyen, and G. Tran. 2015. "Automated 3D Architecture Reconstruction from Photogrammetric Structure and Motion: A Case Study of the 'One Pilla' Pagoda, Hanoi, Vietnam." *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives* 40(7W3):1425–29.
- Vallé, Brett L., and Gregory B. Pasternack. 2006. "Field Mapping and Digital Elevation Modelling of Submerged and Unsubmerged Hydraulic Jump Regions in a Bedrock Step-Pool Channel." *Earth Surface Processes and Landforms* 31(6):646–64.
- Wang, Siyu, Zhikun Ren, Chuanyong Wu, Qiyun Lei, Wenyu Gong, Qi Ou, Huiping Zhang, Guangxue Ren, and Chuanyou Li. 2019. "DEM Generation from Worldview-2 Stereo Imagery and Vertical Accuracy Assessment for Its Application in Active Tectonics." *Geomorphology* 336:107–18.
- Wheaton, Joseph M., James Brasington, Stephen E. Darby, and David A. Sear. 2010. "Accounting for Uncertainty in DEMs from Repeat Topographic Surveys: Improved Sediment Budgets." *Earth Surface Processes and Landforms* 35(2):136–56.
- Zhang, Chunhua, and John M. Kovacs. 2012. "The Application of Small Unmanned Aerial Systems for Precision Agriculture: A Review." *Precision Agriculture* 13(6):693–712.
- Zimmerman, Dale, Claire Pavlik, Amy Ruggles, and Marc P. Armstrong. 1999. "An Experimental Comparison of Ordinary and Universal Kriging and Inverse Distance Weighting." *Mathematical Geology* 31(4):375–90.

Sobre los autores

María Amparo Núñez Andrés

Profesora contratada doctor en el departamento de ingeniería civil y ambiental de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Ingeniera técnica en topografía por la Universitat Politècnica de València (UPV) (1996), Ingeniera en geodesia y cartografía por la UPV (1998) y doctora por la UPC (2006).

Desarrolla su actividad investigadora en el grupo de investigación EGEO (Ingeniería Geomática) del que es coordinadora desde 2014 en el campo de la monitorización y aplicación de técnicas geomáticas: topografía, GNSS, LIDAR y Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la documentación del patrimonio arquitectónico y arqueológico y evaluación de riesgos naturales debidos a desprendimientos a escala local y regional.

Desde sus inicios en la universidad ha participado en un total de 7 proyectos de investigación nacionales, siendo en la actualidad responsable de otro proyecto del mismo ámbito relacionado con la evaluación de riesgo por desprendimientos rocosos del Ministerio de Ciencia e Innovación y la Agencia Estatal de Investigación. También ha participado en 2 proyectos europeos relacionados con el estudio de deslizamientos y la calibración de sensores altimétricos, y 2 proyectos regionales para la modelización de patrimonio arqueológico. Para más información: <https://futur.upc.edu/MariaAmparoNunezAndres>

Felipe Buill Pozuelo

Profesor titular de universidad, doctor por la UPC, Ingeniero Técnico en Topografía (UPM) y Licenciado en Geografía (UB). Tiene una experiencia de más de 30 años en proyectos de transferencia, investigación y docentes relacionados con el ámbito geomático, en especial en levantamientos fotogramétricos y levantamientos con láser escáner terrestre de objetos a gran escala, para gestión y explotación de la información 3D y en la documentación gráfica del patrimonio. Pertenece al grupo de investigación EGEO – Ingeniería Geomática de la UPC.

En los últimos 5 años ha colaborado en 6 proyectos de I+D+i financiados en convocatorias competitivas de Administraciones o entidades públicas y privadas, y 2 contratos, convenios o proyectos de I+D+i no competitivos con Administraciones o entidades públicas o privadas. Para más información: <https://futur.upc.edu/FelipeBuillPozuelo>

Juan Rodríguez Jordana

Licenciado en Ciencias Físicas y Doctor en Física por la Universidad de Barcelona. Profesor Titular de Universidad en Departamento de Matemáticas de la Universitat Politècnica de Catalunya. Su campo de interés es el de las Matemáticas aplicadas a la Geomática, en el que ha publicado diversos trabajos, así como en el campo de la innovación docente en éste y otros ámbitos. Para más información: <https://futur.upc.edu/JuanRodriguezJordana>

Elaboración de mapas de creación abierta para la formación de ingenieros hidráulicos. Caso de estudio: Isla Nerá

Elaboration of open creation maps in the teaching of hydraulic engineering. Isla Nerá case study

Lic. Fernando Fernández Valenciano, Ing. Abel Dorta Armaignac, Ing. Juan Ramón Castellanos González Dr. C. Yamilé Mesa Barrera

REVISTA **MAPPING**
Vol. 29, 204, 54-64
2021
ISSN: 1131-9100

Resumen

En el proceso de formación profesional del Ingeniero Hidráulico de la Universidad de Oriente (Cuba), existen limitaciones en el aprendizaje de los estudiantes en los temas relacionados con el trazado, diseño y proyección de obras hidráulicas, debido a la insuficiente calidad y cantidad de mapas y planos topográficos de una misma cuenca hidrográfica, con condiciones topográficas favorables (nivel de complejidad baja-media), estas son condiciones que exigen los planes de estudios D y E. Teniendo en cuenta estas condiciones y las necesidades (variables) de cada asignatura implicada en el desarrollo de estas habilidades profesionales y como resultado a partir de la implementación de una metodología elaborada para tal fin, se diseñaron los mapas topográficos a escala 1:100 000 y 1: 25 000 de una Isla denominada Nerá, en la cual será posible realizar de forma integral el trazado, diseño y proyección de cualquier tipo de obra hidráulica, bajo los fundamentos de lo que se ha denominado Mapas de Creación Abierta.

Abstract

In the professional training process of the Hydraulic Engineer of the Universidad de Oriente (Cuba), there are limitations in the students' learning in the subjects related to the layout, design and projection of hydraulic works, due to the insufficient quality and quantity of maps and topographic plans of the same hydrographic basin, with favorable topographic conditions (low-medium complexity level), these are conditions required by the D and E curricula. Taking into account these conditions and the needs (variables) of each subject involved in the development of these professional skills and as a result of the implementation of a methodology developed for this purpose, topographic maps were designed at a scale of 1:100 000 and 1: 25 000 of an island called Nerá, in which it will be possible to comprehensively perform the layout, design and projection of any type of hydraulic work, under the foundations of what has been called Open Creation Maps.

Palabras clave: Mapas de Creación Abierta, Isla Nerá, Medios de enseñanza, Formación del Ingeniero Hidráulico.

Keywords: Open Creation Maps, Isla Nerá, Teaching Media, Hydraulic Engineer Training.

Facultad de Construcciones de la Universidad de Oriente
fvalenciano@uo.edu.cu
adorta@uo.edu.cu
ray910210@gmail.com
yamile@uo.edu.cu

Recepción 06/04/2021
Aprobación 16/05/2021

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo es parte de la obra titulada «Estudio sobre Mapas de Creación Abierta», que es una obra protegida. La pertinencia del resultado responde al Proyecto de Investigación (Proyecto Institucional) de la Universidad de Oriente, Cuba; denominado Mapas de Creación Abierta «Proyecto Pseuda» y que comenzó oficialmente en enero del año 2018; participó en la investigación en calidad de ejecutante el Grupo científico estudiantil (GCE) «Medios Didácticos» que tiene como propósito elaborar medios de enseñanza que ayuden al docente en su desempeño y faciliten la adquisición de conocimientos a los estudiantes.

En el proceso de formación profesional del Ingeniero Hidráulico, los medios de enseñanza representan una herramienta adecuada para el desarrollo de los contenidos de las asignaturas de los planes de estudio. Estos favorecen, para el profesor, una mejor orientación de los conocimientos, habilidades, capacidades y valores; así como desde el aprendizaje de los estudiantes en la formación de los modos de actuación profesional con un mejor entendimiento de los procesos y fenómenos de la ciencia en cuestión.

González Castro (1986), en sus investigaciones refiere que los medios de enseñanza son todos aquellos componentes del proceso docente educativo que sirven de soporte material a los métodos de enseñanza (sean instructivos o educativos), para posibilitar el logro de los objetivos planteados, declara que el uso eficiente de los medios de enseñanza logra elevar la calidad del proceso enseñanza-aprendizaje. Aspecto que los autores ha tenido en cuenta para fundamentar la propuesta planteada.

Existe toda una diversidad de medios de enseñanza, tales como: libros de textos, láminas, fotografía, películas, modelos y maquetas, entre muchos otros. Algunos de estos cuentan con mejores potencialidades que otros para el aprendizaje en la carrera de ingeniería hidráulica, tal es el caso de los mapas y los planos topográficos, su papel sobresale por encima del resto, asegurando un mejor tratamiento de los requisitos cualitativos y cuantitativos para el desarrollo de la comunicación del lenguaje gráfico en la diversidad de contextos hidráulicos, los mapas y planos topográficos son de alta aplicación tanto para la labor del profesor como para el desempeño de los estudiantes en las actividades docentes.

Teniéndose en cuenta que un **mapa topográfico** es una representación gráfica, plana y reducida de las formas y dimensiones de elementos de la superficie de la Tierra, que abarca una superficie lo suficientemente grande como para que se note la curvatura de la Tierra; es decir que los elementos que se representan en los mapas son muy generales y de pocos detalles, en la ingeniería hidráulica se

emplean esencialmente para el **planeamiento hidráulico**.

Un **plano topográfico** es lo mismo que un mapa, solo que abarca una superficie lo suficientemente pequeña que puede ser considerada plana, es decir que los planos ofrecen muchos detalles de los elementos del terreno, en la ingeniería hidráulica se emplean principalmente para el **trazado, diseño y proyección de obras hidráulicas**.

Los estudiantes de la carrera que transitan por todos los años académicos emplean los mapas y planos topográficos para: determinación y trazado de las coordenadas de uno o varios puntos deseados; determinación de la pendiente de una línea; cálculo de áreas; cálculo del movimiento de tierras; elaboración de perfiles topográficos; interpretación del contenido altimétrico y planimétrico; replanteo de obras concentradas y lineales; delimitación de cuencas hidrográficas y planeamiento hidráulico. Trazado, diseño y proyección de: sistemas de riego y drenaje; de redes de abasto, alcantarillado y drenaje en zonas urbanas; de canales, trasvases y de presas de tierra; todo esto demuestra que el rol de los mapas y planos topográficos en la adquisición de conocimientos y habilidades profesionales en los estudiantes de la carrera de ingeniería hidráulica es de vital importancia.

Si se habla de importancia hay que resaltar las exigencias de los Planes de estudios vigentes (Plan de estudio D y E), que rigen el proceso de enseñanza-aprendizaje, los cuales para alcanzar las metas propuestas en la calidad de la docencia imponen condiciones a cumplir, el Plan D muestra la intencionalidad de desarrollar todas las actividades docentes dentro de una misma cuenca hidrográfica como unidad básica de estudio de la hidráulica y el Plan E la reconoce como la invariable. Añaden que los mapas y planos topográficos que representen esa cuenca hidrográfica deben de tener condiciones topográficas favorables, dígame nivel de dificultad media-baja.

Para alcanzar una comprensión adecuada del problema que se plantea, es necesario conocer previamente, que en Cuba existen mapas topográficos de todo el país desde la escala 1:100 000 hasta la escala 1:10 000, existe el mapa 1:5 000 de algunas ciudades importantes y planos topográficos a escala 1:2 000 de casi todos los lugares habitados urbanos pero ninguno de la parte rural, escasos planos a escala 1:1 000 y 1:500, o sea que los estudiantes tienen acceso al trabajo con los mapas, pero esta situación limita el trabajo con los planos debido a que el territorio nacional no está mapificado en su totalidad en las escalas grandes; si se necesitan planos topográficos para la docencia de una cuenca hidrográfica real completa, se hace necesario contratar los servicios de alguna empresa, lo que puede resultar muy costoso.

Por otro lado, en el trabajo de mesa, los docentes emplean largas horas para encontrar mapas y planos topográficos de la mapificación nacional que se ajusten

a sus necesidades, como resultado de la búsqueda, con frecuencia, los profesores terminan exhaustos e insatisfechos porque estos mapas y planos representan la realidad objetiva, su rigidez obliga a ajustarse a ellos, esto limita la creación de problemas de ingeniería que desea el docente en número, diversidad y calidad, además los mapas y planos topográficos nacionales no deben ser modificados por su condición de obra protegida, por lo tanto estos mapas en un porcentaje considerable no se articulan con las necesidades de los docentes.

En los mapas nacionales la interpretación del contenido altimétrico resulta difícil para los estudiantes, ya que en la mayoría de estos mapas donde el relieve no es llano, existen zonas que se hacen ilegibles si se trata de **definir** determinados elementos según el trazado que describen las curvas de nivel, un ejemplo claro se pone de manifiesto en la delimitación de una cuenca hidrográfica, realizar el trazado correcto de los límites de la cuenca a través de las líneas divisorias, pasa primero por el concepto del elemento en cuestión, luego en el mapa o plano se aplica dicho concepto venciendo la abstracción que producen las curvas de nivel para identificar el elemento y su eje, este último es quien define los límites de la cuenca y puede ser gráficamente definido o no, haciendo el proceso engorroso; en ocasiones a los especialistas se les hace complicado, refieren experimentar sensación de incertidumbre, una falsa impresión de impericia, o en algún que otro caso pareciera estar frente a un error de compilación, estos planteamientos corroboran lo delicado del proceso cognitivo donde la representación de la realidad objetiva puede limitar una transición adecuada del conocimiento, de lo simple a lo profundo.

Teniendo en cuenta los resultados del diagnóstico realizado, en la práctica del proceso de enseñanza-aprendizaje se han encontrado las siguientes **insuficiencias**:

- Existen mapas topográficos nacionales que representan los elementos de una misma cuenca hidrográfica, pero no así los planos topográficos porque en el país no están mapeadas las zonas rurales en las escalas más grandes.
- En el departamento- carrera no están en existencia planos topográficos digitales y pocos en papel.
- Los mapas y planos topográficos de la mapeación nacional con frecuencia no reúnen las condiciones topográficas favorables que establecen los planes de estudio en cuanto al contenido, limitando recurrentemente la interpretación adecuada de los elementos del relieve en los estudiantes y limitando a los especialistas de la carrera a crear variantes de estudios con calidad.
- La adquisición de mapas y planos topográficos es costosa.
- No es legal modificar bases cartográficas reales.

Problema: La insuficiente cantidad y calidad de mapas

y planos topográficos de una misma cuenca hidrográfica con condiciones favorables para el trazado, diseño y proyección de obras hidráulicas, limita la calidad del proceso de formación del ingeniero hidráulico.

Objetivo: Elaborar Mapas y planos topográficos de creación abierta (de la Isla Nerá), de una misma cuenca hidrográfica con condiciones favorables para elevar la calidad del proceso de formación del ingeniero hidráulico en los temas referidos al trazado, diseño y proyección de obras hidráulicas.

Se le ha denominado **Mapas de Creación Abierta (MCA)** a la creación, por el usuario final, de bases cartográficas de un territorio que se concibe a partir de condiciones y variables determinadas en función de un objetivo, donde se aplican los métodos de la cartografía, la geodesia, la topografía, la tecnología y la creatividad, siempre con carácter flexible, en cualquier soporte, para desarrollar una o varias actividades determinadas sobre un escenario adecuado o Idóneo.

Dicho de otra manera más ilustrada, para realizar la proyección de una obra hidráulica, primeramente se necesita un plano topográfico actualizado de la zona de trabajo, el especialista primero tiene que interpretar las características de los elementos que componen el relieve en el plano, luego atendiendo a todo esto, ingenia, propone, resuelve, traza, diseña, proyecta una o varias soluciones viables, **es decir, se ajusta la obra a la topografía.**

En los Mapas de Creación de Abierta se hace al contrario, el especialista desea un escenario adecuado o idóneo para el trazado, diseño y proyección de una o varias obras hidráulicas, la cual tiene preconcebida, declara las condiciones y variables deseadas, y en función de estas crea o diseña la topografía en el plano; quiere decirse que el principio básico es la elaboración de los elementos del terreno a representar y su relación espacio-contenido-forma en función de los objetivos propuestos, o sea, **se diseña la topografía en función cada obra.**

En el tiempo varios han sido los mapas y planos topográficos de creación abierta que se han elaborado de forma aislada en el departamento de ingeniería hidráulica de la Facultad de construcciones de la Universidad de Oriente, Cuba. Mapas y planos para satisfacer por independiente, la demanda de los proyectos integradores, trabajos extraclases, talleres y estudio individual.

Pero ciertamente ninguno cumplía las condiciones que exigen los planes de estudio en cuanto a la integración de los conocimientos en su carácter sistémico, ya que cada mapa o plano de creación abierta empleado en la docencia, a pesar que cumplía con el requisito de condiciones topográficas favorables para la actividad hidráulica que fue diseñado, no pertenecía o no formaba parte de una misma cuenca hidrográfica.

Ante esta situación, el Claustro en sus reuniones metodológicas propuso las siguientes ideas: Diseñar un territorio adecuado o idóneo, con todas las condiciones topográficas favorables para el desarrollo de **cualquier tipo de obra hidráulica**, donde todos los estudiantes de la carrera, a través de variantes de estudios creadas por los docentes, puedan solucionar todos los problemas de ingeniería a los que se enfrenten, referidos al trazado, diseño y proyección de obras; trabajando, transformando la misma cuenca hidrográfica que se les designe desde el primer año académico hasta el último, con un alto nivel de integración, en función de mejorar la calidad del aprendizaje y de esta manera cumplir a cabalidad con los requisitos que exigen los Planes de Estudios.

Para completar las ideas se sumaron algunos detalles: Que los docentes de cada asignatura relacionada con el tema en cuestión añadieran o aportaran sus ideas y variables en función de sus necesidades; que los límites no fueran un parteaguas sino una línea de costa, así se propuso diseñar una Isla con una cuenca hidrográfica principal en su interior; que los Mapas y planos de creación abierta a realizar cumplieran y respetaran los principios, conceptos y requisitos de la cartografía convencional en cuanto a la base matemática y a la representación; se propuso el nombre de «Nerá» para la Isla que significa «Aguas» en griego y finalmente elaborar una metodología para guiar los procesos. El resultado de esta integración es el escenario topográfico de la Isla Nerá, diseñada exclusivamente para tales fines, los Mapas de creación abierta representan una alternativa en la formación del ingeniero hidráulico.

Los Mapas de Creación Abierta tienen varias ventajas en la docencia con respecto a los mapas nacionales: son muy económicos, se elaboran con pocos recursos; son muy flexibles ya que se pueden representar los elementos de la superficie de la tierra que se necesitan en el tamaño y la forma que se desee; las variantes de estudios pueden modificarse cuando sea necesario e incluso crear nuevas; y pueden concebirse en cualquier soporte.

En los «MCA» se definen con precisión las características típicas de los elementos del relieve, dígame: ejes de vaguadas, líneas divisorias, elevaciones, cimas y sillars, las curvas de nivel son menos sinuosas y armonizan debidamente con la hidrografía; en sentido general se representan con mucha claridad conceptual todos estos elementos de manera tal que el margen al error pudiera ser menor. Estos mapas pueden constituir un importante paso intermedio para la interpretación de los mapas y planos topográficos nacionales, de esta manera se cumple con el enfoque acerca de la impartición de los conocimientos que establecen los planes de estudios, los cuales indican que debe ser, de lo más sencillo a lo más complejo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Todos los materiales y métodos empleados en la elaboración de Mapas de Creación Abierta son los mismos que se utilizan en la cartografía moderna pero no en el mismo orden, desde este punto de vista dicha elaboración puede considerarse un proceso de **ingeniería o cartografía inversa**, comenzando por un planeamiento topográfico a una escala pequeña que permitiera abarcar todo el territorio a representar teniendo en cuenta las formas y dimensiones de los elementos deseados, luego ir derivando (en todos los casos la derivación es de ampliación) e incorporando nuevos elementos (en un proceso contrario a la generalización) en la medida que se hace el pase de una escala a la otra, al cual hemos denominado «Recompilación cartográfica». De esta manera, inicialmente se concibió el planeamiento topográfico del mapa 1:100 000 a lápiz, sobre cartulina (solo relieve e hidrografía), que luego fue derivado a la escala 1:25 000 hasta su terminación y para el futuro inmediato se derivará desde esta escala a la escala 1:2 000 y finalmente se elaborará una plataforma cartográfica digital; teniendo en cuenta todo lo anteriormente planteado se hizo necesario elaborar una metodología que estuviera en concordancia con esta otra forma de hacer mapas, para cumplir con los objetivos propuestos.

Metodología para la elaboración de Mapas de Creación Abierta, caso de estudio Isla Nerá

La metodología en su sentido más amplio, según refiere Nerelys de Armas (2007) es el estudio filosófico de los métodos del conocimiento y transformación de la realidad, en un plano más estrecho incluye el conjunto de métodos, procedimientos y técnicas que responden a una o varias ciencias en relación con sus características y su objeto de estudio, en este sentido la metodología es elaborada al interior de una o varias disciplinas y permite el uso cada vez más eficaz de las técnicas y procedimientos que se disponen a fin de conocer más y mejor el objeto de estudio.

Este planteamiento aborda el concepto de metodología desde lo general a lo particular de manera que, se define con claridad la utilización del método como herramienta para la adquisición de conocimientos científicos sobre un objeto; para la elaboración de la metodología que se trae como propuesta, se asumen además los fundamentos planteados desde lo particular, es decir al interior de la carrera de Ingeniería hidráulica.

Los Mapas de Creación de Abierta para su elaboración, se rigen por una metodología que tiene una misma estructura indistintamente del objetivo y de la complejidad del territorio a representar y está compuesta por cuatro etapas:

- I Etapa: trabajos preparatorios.
- II Etapa: ejecución de los trabajos.

- III Etapa: terminaciones.
- IV Etapa: evaluación y control.

En este trabajo solo se abordarán los procesos hasta la terminación del mapa 1:25 000 que es el estado actual de la ejecución del proyecto.

I Etapa: trabajos preparatorios.

En esta etapa a partir de las condiciones y variables que debe cumplir la topografía de la Isla Nerá, se recopila toda la información necesaria para la ejecución de los trabajos, se confeccionan las indicaciones de redacción y se llevó a cabo la concepción del espacio geográfico.

Condiciones y variables que debe cumplir la topografía de la Isla Nerá, aprobadas por el Claustro.

Condiciones Espaciales principales.

La Isla debe tener:

- 1- Un espacio geográfico delimitado en el elipsoide.
- 2- Una proyección Cartográfica oficial.
- 3- Tres sistemas de coordenadas.
- 4- Formatos y nomenclaturas propios.
- 5- Red Geodésica acorde en precisión a las actividades a realizar (nominal).

Condiciones geográficas principales

- 1- Una gran cuenca hidrográfica principal (única, que será la misma para todos los trabajos), como unidad básica de estudio de la hidráulica, según el Plan de Estudio D.
- 2- La cuenca principal debe estar dividida en el mayor número posible de subcuencas.
- 3- El escenario topográfico debe tener condiciones topográficas favorables (nivel de dificultad media-baja).

Cada subcuenca dentro de la cuenca principal debe cumplir las siguientes condiciones y variables:

Cada subcuenca debe tener:

- 1- Un río secundario y varios afluentes.
- 2- Un área total no menor de 35 km².
- 3- Posibilidades de cierres visibles, para presas de categoría 3 y 4 (alto de la cortina entre 60 y 80 metros de altura)
- 4- Un espacio destinado a la actividad de riego y drenaje, que tenga un área no menor de 100 ha y la pendiente máxima hasta el 2 %.
- 5- Una red vial suficiente, carreteras de segundo orden, y caminos entrelazados entre sí armónicamente.
- 6- Dos puntos poblados, para las redes de abastecimiento, 10 000 habitantes máximo.
- 7- Una división político-administrativa.
- 8- Suelos, límites y protecciones, en función de los objetivos.

- 09-Vegetación, en función de los objetivos.
- 10-Rotulado, en función de los objetivos.
- 11- Simbología, en función de los objetivos.

I.1. Indicaciones de Redacción.

Documento técnico rector de la actividad, en ella se recogen todos los detalles del contenido del mapa a crear, desde la Introducción hasta la división de hojas cartográficas, formato y datos marginales.

I.2. Creación del espacio Geográfico.

En este proceso se crea el espacio Geográfico con una población estimada, se determina la posición que va a ocupar la Isla en el elipsoide, se escoge una Proyección Cartográfica Oficial, los sistemas de coordenadas, los formatos y nomenclaturas.

I.3. Boceto de las ideas iniciales.

Concepción espacial preliminar de los elementos a representar teniendo en cuenta la forma y dimensiones deseadas, se elaborarán como mínimo tres variantes.

II Etapa: ejecución de los trabajos

II.1. Creación del mapa 1:100 000.

En este proceso se materializa la distribución espacial de los elementos del contenido y sus formas, se procede a realizar una división territorial armónica y funcional del relieve, este se representa a través de curvas de nivel, en función de las condiciones y variables declaradas, el diseño se comienza por el trazado de la hidrografía y las divisorias principales.

II.2. Creación del mapa 1:25 000.

Este proceso cuenta con dos subprocesos: la derivación cartográfica y la vectorización para la conversión de la representación del papel a digital.

II.2.1. Derivación cartográfica.

Este proceso puede realizarse por cualquier vía posible, teniendo en cuenta que es una ampliación.

II.2.2. Vectorización del mapa 1:25 000.

Este proceso se realiza a partir del escaneo del mapa base o a través de fotografías, luego se pasan esas imágenes al *software* de dibujo y se procesan, quedando así el contenido de forma digital.

III Etapa: terminaciones.

III.1. Terminación del mapa 1:25 000

Completamiento, edición y acabado las informaciones del contenido del mapa topográfico 1:25 000.

IV Etapa: control y evaluación.

En esta etapa se procederá a la evaluación del resultado final de la ejecución de los trabajos, el control se realizará

durante y después de cada proceso de cada etapa y a través de criterios de los especialistas a partir de indicadores con la posibilidad de tener una valoración efectiva del proceso.

3. RESULTADOS

Resultados por etapas atendiendo a las condiciones y variables que debe cumplir la topografía de la Isla Nerá.

I Etapa: trabajos preparatorios

I.1. Se confeccionaron las Indicaciones del mapa topográfico 1:100 000 y del mapa topográfico digital 1:25 000.

I.2. El **espacio geográfico** es el espacio físico organizado por la sociedad o también puede decirse que es la organización de la sociedad enfocada desde una óptica espacial, el espacio de geográfico de la Isla Nerá es nominal.

La Isla Nerá se encuentra en los 27° 00' de Longitud Oeste y los 00° 16' de Latitud Norte, Zona UTM N-26 (Figura 1), se escogió esta posición porque es un lugar donde las deformaciones cartográficas son casi nulas.

La Isla está bañada en su totalidad por las aguas del océano Atlántico y coincide en la unión de las placas continentales africana y sudamericana; su división político-administrativa está compuesta por diecisiete distritos, cuenta con una superficie total de 2190,94 km² y una población estimada en un poco más de un cuarto de millón de habitantes.

Posee en su interior una gran cuenca hidrográfica con una superficie de 1385,9 km², dividida en dieciséis subcuencas; por las formas del relieve puede decirse que la formación geológica de la Isla está en correspondencia con la de una caldera volcánica, donde se describen montañas en formas circulares de las cuales salen mangas o trompas de tierra hacia su centro, cuenta con un río principal que atraviesa la cuenca de Norte a Sur, lleva por nombre «Albear» (en homenaje al ilustre ingeniero militar español Francisco de Albear), y cuenta con una longitud total de 83,8 km; sus numerosos ríos, afluentes convierten a la Isla en una gran

fuerza de este recurso; fuera de la cuenca principal en sus laderas exteriores se forman alrededor de cien pequeñas cuencas costeras con ríos pequeños de mucha pendiente.

- Se escogió y se implementó la Proyección Cilíndrica Trasversal de Mercator, (UTM) como la proyección Cartográfica Oficial, la Isla Nerá tiene una misma proyección cartográfica para mapas y planos topográficos.

- Se escogieron y se implementaron tres sistemas de coordenadas: Planas rectangulares Arbitrarias (Propias), «UTM» y Geográficas, en una hoja de mapa o plano topográfico por cuadrículas se relacionan los valores correspondientes a cada tipo de coordenadas una debajo de la otra, en color azul, rojo y negro respectivamente. (Figura 2)

- Para determinar el origen de las nomenclaturas se tomó como referencia la idea de las divisiones y nomenclaturas catastrales cubanas, las cuales parten de un cuadrado base de 25 km x 25 km, en este caso el cuadrado base tiene unas dimensiones en el terreno de 500 km x 500 km, el cual representa el formato de una hoja 1:1 000 000.

Se creó un sistema de nomenclaturas único y común para mapas y planos topográficos, con el mismo formato de 50 cm x 50 cm; la división de hojas que determina el formato de los mapas como práctica a nivel mundial, corresponde a una amplitud angular proporcional de meridianos y paralelos según la proyección cartográfica empleada y la escala deseada; en los «MCA» de la Isla Nerá el formato interior de todas las hoja de mapas y planos es una división expresada en distancia y las esquinas geográficas (vértices de la hoja de mapa) tendrán el valor angular equivalente a valor lineal que le corresponda.

La mayor de las escalas convencionales topográficas establecida en Cuba es 1:500, sin embargo, en esta propuesta se incluyen las escalas 1:200; 1:100 y 1:50, dándole

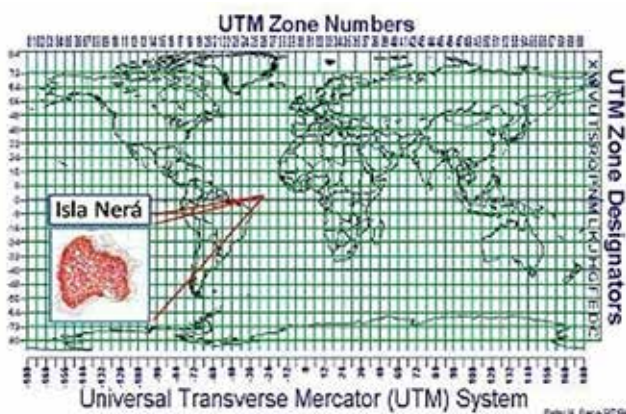
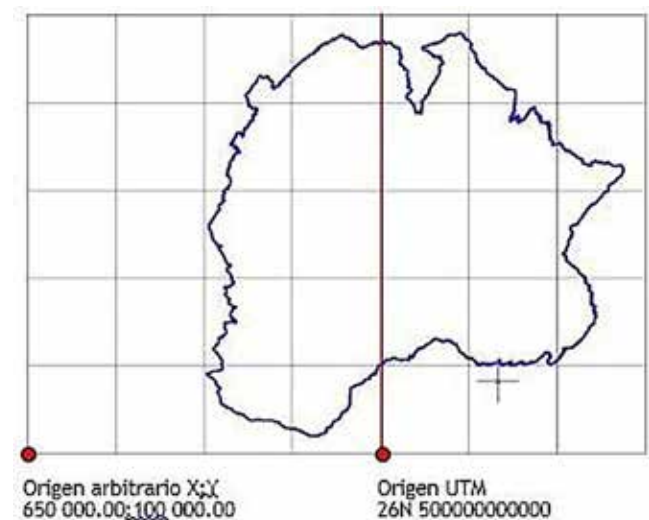


Figura 1. Posición Geográfica de la Isla Nerá



Figuras. 2. Orígenes de coordenadas planas.

oportunidad a las escalas arquitectónicas de trabajar en un espacio georreferenciado si así se desea.

Se hizo una Red Geodésica básica, de pocos puntos debido a que la posición relativa de cualquier punto o puntos deseados es conocida.

I.3. Boceto de las ideas iniciales.

Se esbozaron las ideas iniciales, se definieron de modo general las formas y dimensiones de los elementos interiores de la cuenca hidrográfica principal y por consiguiente la forma de la Isla, se presentaron tres variantes a lápiz sobre cartulina.

II Etapa: ejecución de los trabajos

II.1. Creación del mapa 1:100 000

En este proceso se materializó la distribución espacial de los elementos del contenido y sus formas, o sea el **planeamiento topográfico**, acorde a las condiciones y variables establecidas. Este proceso se realizó íntegramente a mano alzada, el relieve se representó por el método de curvas de nivel a equidistancia de 50 m.

- Se logró que todo el escenario topográfico de la Isla fuera diseñado con condiciones favorables para desarrollar todas las actividades docentes referidas al trazado diseño y proyección de cualquier tipo de obras hidráulicas.
- Se trazó un río secundario dentro de cada subcuenca y varios afluentes.
- Se trazó una red geodésica básica de pocos puntos porque el mapa digital georreferenciado brinda la posición relativa cualquier punto deseado.
- Se logró que la subcuenca de menor área dentro de la cuenca principal ocupara una superficie total no menor 35 km², se trata de la subcuenca del río Peillón, en el distrito Aguada, situado al NNW de la isla, con una superficie total de 36,4 km².
- Atendiendo a la geomorfología diseñada, cada subcuenca tiene muchas posibilidades de cierres visibles, para presas de categoría 3 (alto de la cortina entre 60 y 80 m de altura).
- Se diseñó dentro de cada subcuenca un espacio destinado a la actividad de riego y drenaje, con un área no menor de 100 ha y una pendiente máxima no mayor del 2%, la mayoría de las subcuencas disponen de dos y hasta tres espacios para esta actividad.

II.2 Creación del mapa 1:25 000

La creación del mapa 1:25 000 cuenta dos subprocesos:

- La derivación cartográfica del mapa 1:100 000 al mapa 1:25 000.
- La vectorización para la conversión del mapa 1:25 000 del papel a digital.

II.2.1. Derivación Cartográfica

Una vez terminado el mapa 1:100 000, se le da continuidad al proceso para la creación del mapa 1:25 000, comenzando por la derivación cartográfica, esta se realiza pasando a tinta todos los elementos que componen el mapa 1:100 000 a planchas fragmentadas de acetato transparente, con el empleo de un retroproyector se proyectaron en la pared los elementos representados en las planchas de acetato, se realiza un proceso de ajuste y escalado desplazando el proyector horizontalmente hasta lograr la distancia objeto adecuada, haciendo coincidir la imagen proyectada al tamaño del formato del papel situado en la pared, luego se dibujan los elementos proyectados en el papel, quedando como resultado un ori-

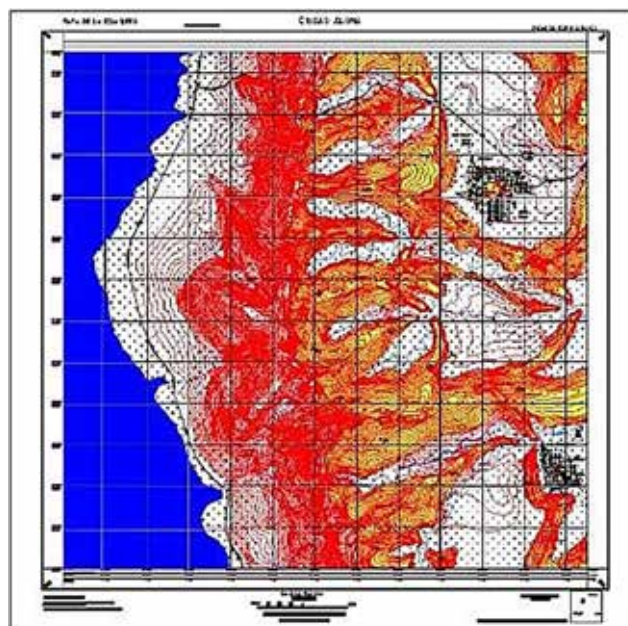


Figura 3. Hoja 1:25 000 terminada



Figura 4. Modelo digital de la Isla, (Terminada)

ginal en papel del mapa 1:25 000, solo hidrografía y relieve, se derivaron veintiuna hojas de mapa a escala 1:25 000.

II.2 .2. Vectorización el mapa 1:25 000

Este proceso se realiza fotografiando o escaneando cada una de las hojas que componen el mapa 1:25 000, luego se pasan a un *software* procesador de imágenes para preeditarlas, esas imágenes luego se ponen de fondo en el *software* de dibujo y se realiza la vectorización, quedando así el contenido del mapa de forma digital, se vectorizaron veintiuna hojas de mapa a escala 1:25 000.

III Etapa: terminaciones

III.1 Terminación del digital mapa 1:25 000.

Una vez terminada la vectorización comenzaron los trabajos de terminación del mapa 1:25 000 dándole salida a la representación del resto de los elementos previstos. (Figuras 3 y 4)

- La red vial se caracteriza por tener una autopista de seis vías y numerosas carreteras, todas de cuatro vías que enlazan los puntos poblados en todas las direcciones; la autopista atraviesa la Isla de Norte a Sur de ahí su nombre, posee un túnel que comunica por su lado norte a la cuenca principal con la costa; existen dos carreteras principales: la carretera «Este-Oeste», con dos túneles, uno en cada punto cardinal, que comunican el interior de Isla con las zonas costeras atravesando la «Sierra Redonda» y la carretera «Periférica» que como su nombre lo indica bordea la isla, el resto de la carreteras unen los pueblos con la autopista.
- La Isla cuenta con un total de 34 puntos poblados y una ciudad situada al Norte que es la capital denominada «Nerópolis»; dentro de cada subcuenca existen dos puntos poblados considerados pequeños, aunque uno de ellos es mayor que el otro, con una población estimada de 10 000 habitantes.
- La división político-administrativa está conformada por diecisiete «Distritos», incluyendo el de la capital que es el único que está completamente fuera de la cuenca principal.
- Se han empleado diferentes límites según se establecen en las indicaciones de redacción, resaltan los naturales ejemplo: Ríos, divisorias o la línea de costa, empleados en la división político administrativa, la representación de estos se corresponde en forma, dimensiones y color con la de los mapas cubanos, no se descartan otros tipos de límites y protecciones, no se indican aún los tipos de suelo, pero se infiere que son suelos buenos para el desarrollo de la agricultura.
- La vegetación predominante es forestal y pasto, predominan grandes áreas de bosques en las laderas interiores de la cuenca principal, en el resto de las áreas dentro

y fuera de la cuenca principal predomina el pasto.

- Se han empleado diferentes tipos de letras y de diferentes tamaños para los rótulos según se establecen en las indicaciones de redacción, en su mayoría coinciden con los mismos empleados en los mapas cubanos.
- La simbología utilizada coincide en un alto por ciento con la misma de los mapas cubanos.

4. DISCUSIÓN

La creación o invención de mapas y planos topográficos con fines docentes es una práctica local y es posible que también sea así en algunos lugares del mundo, pero hasta la fecha y como resultado de la búsqueda de los antecedentes de los Mapas de Creación Abierta no se han encontrado referentes.

Los mapas de creación abierta como medio de enseñanza pretenden elevar la eficiencia en la calidad del proceso enseñanza-aprendizaje de la carrera de ingeniería hidráulica, en un principio se elaboraron mapas y plano topográficos de forma aislada que no formaban parte de una misma cuenca hidrográfica ejemplo: Plano topográfico digital para la construcción de una conductora de agua potable, en el «Proyecto Integrador II», (Figura 5) que se desarrolla del 2º año académico.

Ejercicio del taller N°. 4 de topografía sobre delimitación de cuencas que se desarrolla en el 1er año académico. (Figura 6)

Plano topográfico digital donde los estudiantes escogen atendiendo a ciertas variables el lugar idóneo para el trazado del o de los posibles cierres para represar el agua, luego el diseño y proyección de la cortina (Figuras 7 y 8), que se desarrolla en el «Proyecto integrador VI» del 5º año académico.

En la Isla Nerá se han realizado dos experimentos, uno parecido al ejemplo que se muestra de «Presas de tierra», con magníficos resultados, y el otro en la asignatura «Proyecto integrador V», (figuras 9 y 10), que se lleva a cabo en el 4º año académico, donde los estudiantes deben desarrollar habilidades relacionadas con el trazado, diseño y proyección de obras de acueducto, alcantarillado y drenaje en zonas urbanas. Se escogió para este proyecto una porción de la cuenca del río Trujillo la cual posee un área de 74,4 km², ubicada en la parte sur oriental de la Isla, en el distrito Cristal; para este trabajo al igual que para el caso de presas de tierra se derivó de forma experimental del mapa 1:25 000 esta porción de la Isla a la escala 1:2 000, el trabajo se desarrolló en un poblado denominado «Alayo», el cual había tenido una ampliación urbana al noreste del pueblo, la cual no era posible unir al sistema viejo porque no daba abasto y se decidió hacer una nueva red de abastecimiento,



Figura 5. Proyecto de construcción de una conductora.



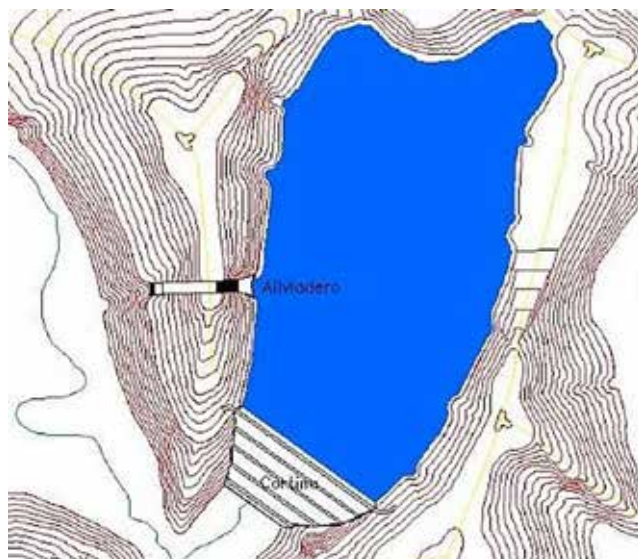
Figura 6. Delimitación de Cuencas hidrográficas.

alcantarillado y drenaje; los resultados fueron muy buenos los estudiantes lograron desarrollar las habilidades profesionales según lo previsto, el ejercicio experimental fue exitoso.

Faltan por ensayar muchas variantes de estudios de diferentes tipos de obras hidráulicas sobre la topografía de la Isla; con el uso y aplicación de estos mapas y planos se espera un incremento considerable en la calidad del proceso de enseñanza-aprendizaje en la carrera de Ingeniería hidráulica.

Valoración de la metodología propuesta por los especialistas

Se aplicaron entrevistas y encuestas a varios especialistas del grupo empresarial Geocuba y de la Universidad de Oriente, arrojando los siguientes resultados: coinciden en su totalidad que la propuesta es flexible porque se pueden crear las variantes de estudios deseadas con posibilidad de modificarlas; Coinciden en un 100 % en que la propuesta es



Figuras.7 y 8. Trazado, diseño y proyección de una presa.

bueno desde el punto de vista económico por el bajo costo de la ejecución. Consideran que la propuesta es integradora porque todas las actividades docentes se desarrollan en una misma cuenca hidrográfica, en varias asignaturas y abarca diversas obras. Todos coinciden que es útil, por todo lo que se puede lograr tanto en la formación de los estudiantes durante el desarrollo del proceso de enseñanza-aprendizaje, así como en la preparación de los especialistas de la carrera capaces de elaborar o modificar sus propios mapas y planos acorde a las necesidades del plan de estudio. Consideran en un 100 % atendiendo a todo lo planteado en estos parámetros que es buena la calidad de la propuesta, que es aplicable, y que es ventajosa su signi-

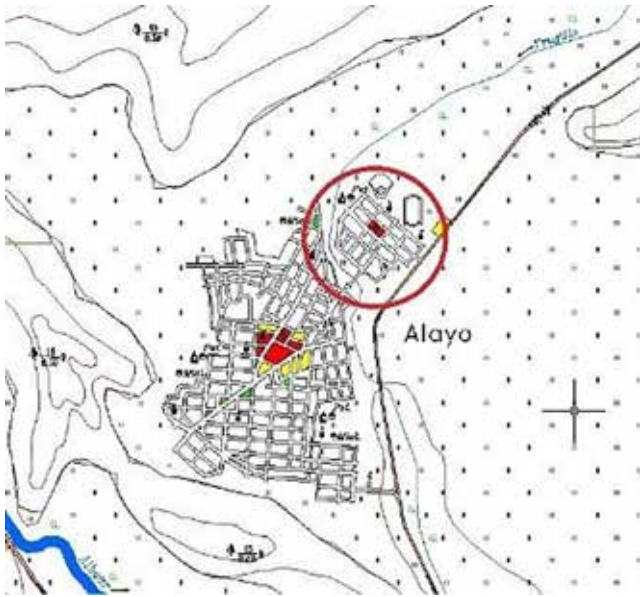


Figura 9. Poblado Alayo



Figura 10. Propuesta del acueducto de la ampliación de Alayo.

ficación práctica.

5. CONCLUSIONES

- Los Mapas de Creación Abierta se establecen como un resultado novedoso para el perfeccionamiento de los mapas y planos topográficos como medio de enseñanza-aprendizaje en la formación del Ingeniero Hidráulico y constituyen en vía efectiva para la conducción de dicho proceso en la solución de problemas ingenieriles de la carrera.

- Se constató la concepción del espacio Geográfico de la Isla Nerá, la creación del mapa topográfico a escala 1:100 000 y la creación del mapa topográfico digital a escala 1:25 000.
- Los ensayos realizados en la Isla fueron exitosos, se trabajó en una misma cuenca hidrográfica con condiciones topográficas favorables para todo tipo de obras hidráulicas.
- Los «MCA» constituyen un paso intermedio para que los estudiantes de la carrera desarrollen las habilidades profesionales referidas a la interpretación del contenido en los mapas y planos topográficos nacionales.
- Los criterios de especialistas, reconocen la factibilidad de los mapas de creación abierta para la formación de las habilidades profesionales referidas al **trazado, diseño y proyección de obras hidráulicas** en el proceso de formación del Ingeniero Hidráulico, acreditando el valor científico-metodológico de la propuesta, que contribuye a la apropiación de los modos de actuación.

6. AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Oriente en Santiago de Cuba por su apoyo financiero en calidad de proyecto institucional; a los valerosos estudiantes del Grupo Científico Estudiantil «Medios Didácticos» que no reciben la asignatura «Geomática» de forma curricular y dedicaron muchas horas a aprenderla, a aplicarla y a disfrutarla; a la Empresa GEOCUBA Oriente Sur por la formación profesional; al ilustre Dr.C. Pedro Lázaro Romero Suárez por su aporte, considerado uno de los principales iniciadores de esta actividad en Cuba, y por último y no menos importante, a nuestro Dios amoroso y a mi familia por su valiosa ayuda, a todos, muchas gracias.

REFERENCIAS

- Cano, R.** (1991) «Selección de medios para la enseñanza», revista tetla-ni, año 8, no 62 México.
- González Castro, V.** (1986). *Teoría y Práctica de los medios de enseñanza*, Editorial Pueblo y Educación, La Habana.
- Pellicer Pérez, J.** (1986). *Cartografía*. Editorial Pueblo y Educación, La Habana.
- Klingberg, L.** (1989). *Introducción a la didáctica general*, Editorial Pueblo y Educación La Habana.
- Uría Peña, A M.** (1989). *Medios de enseñanza: infinidad de iniciativas*, Editorial Pueblo y Educación, La Habana.
- Cubero Allende, J.** (1985). *Los medios de enseñanza en la educación superior*. Ed. Universidad de la Habana, La Habana.

De Armas, N. (2007). *Aproximación al estudio de la metodología como resultado científico*, La Habana.

Torres Arroyo, J G. (2005). *El mapa, más allá del diseño*.

Otros significados de los mapas, en Jornada de reflexión académica en diseño y comunicación, 245-260 pp. ISSN 1668-1673.

Sobre los autores

Fernando Fernández Valenciano

Graduado de Geodesia y Cartografía (1991), en "Iliá Ivanov", Ciudad Habana. Trabajó en el otrora instituto Cubano de Geodesia y Cartografía (ICGC), en la provincia de Holguín, transitando por las disciplinas: Cartografía y Fotogrametría aérea. Trabajó en el (ICGC) de Santiago de Cuba en las disciplinas: fotogrametría terrestre, levantamiento directo, actualización del plano 1:2 000. Trabajó en el Grupo empresarial Geocuba en: La ejecución del mapa 1:5 000 de la ciudad de Santiago de Cuba, catastro urbano, cartografía digital y en la actividad de construcción de maquetas topográficas. Es Licenciado en Educación en la especialidad de Construcciones, es doctorando en ciencias de la Educación, se desempeña como profesor de topografía en la carrera de Ingeniería hidráulica de la Universidad de Oriente, Cuba. Posee registros de obras. Trabaja la línea de investigación de medios de enseñanza relacionadas con la construcción de maquetas topográficas y la elaboración de Mapas de Creación Abierta.

Abel Dorta Armaignac

Graduado de Ingeniería Hidráulica en la Universidad de Oriente en el año 1996. Se ha desempeñado como profesor de la carrera Ingeniería Hidráulica por más de 20 años ocupando responsabilidades desde Profesor Principal de Asignatura, Jefe de Disciplina hasta Jefe de Departamento Docente. Ostenta actualmente la categoría docente de Profesor Auxiliar. Fue miembro de la Comisión Nacional de la Carrera Ingeniería Hidráulica en el período de 2007-2010, participando en la elaboración del Plan de Estudio D. Ha impartido tanto en pregrado como en postgrado asignaturas relacionadas con la especialidad en las temáticas de Mecánica de los Fluidos, Obras hidráulicas, Hidráulica de las conducciones libres, Ingeniería de Riego, Abastecimiento de Agua, Alcantarillado y Drenaje Pluvial e Hidrometría. Se desempeñó como Profesor Principal de los Proyectos Integradores del Plan de Estudio D de la carrera. Es uno de los principales promotores de la elaboración de mapas de creación abierta en la solución de problemas de ingeniería hidráulica para la docencia, aportando valiosas ideas e iniciativas relacionadas con el tema, es el autor del planeamiento hidráulico de la isla Nerá, posee registros de obras.

Juan Ramón Castellanos González

Ingeniero en Hidrografía y Geodesia, Academia Naval «Granma», Cuba. Laboró por espacio de cuatro años en el Grupo Empresarial GEOCUBA Oriente Sur, de la provincia Santiago de Cuba. En dicho centro se especializó en Proyectos de Estudios de Clima de Oleaje, Marea y Corrientes Marinas, enfocados a los trabajos de protección y restructuración de dunas y sectores costeros.

Actualmente se desempeña como especialista en el Centro de Estudios Multidisciplinarios de Zonas Costeras (CEMZOC), Universidad de Oriente, Cuba. Implementa en el mismo el uso de la Teledetección y sus aplicaciones en los Sistemas de Informaciones Geográficas (SIG) asociados al Manejo Integrado en Zonas Costeras. Actualmente es maestrante de la VII Edición de la Maestría de Manejo Integrado en Zonas Costeras de la Universidad de Oriente, dentro del proyecto de Mapas de creación abierta asume las tareas referidas a la construcción de los modelos digitales del terreno y la elaboración de la plataforma cartográfica digital.

Yamilé Mesa Barrera

Profesora Titular. Doctora en Ciencias Pedagógicas, graduada en Licenciada en Educación en la especialidad Construcción Civil. Máster en Pedagogía Profesional. Lugar de nacimiento Cuba. Graduada en 1991 en la Universidad de Ciencias Pedagógicas José de la Luz y Caballero ubicada en la ciudad de Holguín, se desempeñó primeramente como docente de la Educación Técnica y Profesional de las especialidades Dibujo de Construcción y Construcción Civil, luego continuó su labor docente en la Universidad de Ciencias Pedagógicas Frank País García, centros que radican en su ciudad natal. En la actualidad es profesora e investigadora del Departamento carrera de Ingeniería Civil en la Facultad de Construcciones de la Universidad de Oriente, Cuba. Se desempeña como Vicedecana de Investigación y Posgrado. Posee publicaciones de impacto en revistas especializadas en las líneas de investigación relacionada con la Pedagogía y Didácticas de las ramas técnicas. Tiene registros de obras. Realizó estancia posdoctoral en la Universidad de Málaga, España en el 2018. Ha participado en eventos nacionales e internacionales. Ha sido tutora de tesis de Maestrías y de Doctorado. Es miembros del Centro Latinoamericano de Epistemología y Pedagogía, dentro del proyecto de Mapas de creación abierta asume la parte pedagógica.

GEODRONE

CONYCA AERO



PRECISOS · VERSÁTILES · ROBUSTOS



Llega donde nadie ha llegado

Cartografía grandes áreas
de manera sencilla, rápida
y precisa.

GNSS PPK Y RTK A BORDO

DSM-MODELO DIGITAL, ORTOFOTO, RESTITUCIÓN, Y ADEMÁS...



TOPOGRAFÍA, DEFENSA, CATASTRO, AGRICULTURA, OBRA CIVIL, INSPECCIÓN,
REALIDAD AUMENTADA Y VIRTUAL, RESTITUCIÓN ESTEREOSCÓPIA.

WWW.GEODRONE.ES

info@geodrone.es

+34 91 382 40 72



La esfera del firmamento

MARIO RUIZ MORALES

RESUMEN

En el firmamento, una de las palabras más bonitas de nuestro vocabulario, hace mención al cielo estrellado que nos envuelve. Pero etimológicamente se refiere igualmente al carácter estable de todas las luminarias, de ahí que para referirse a él se emplease después la expresión esfera de las fijas. Un ejemplo de los primeros es Miguel de Unamuno, con su poema «La Luna y la rosa».

ABSTRAC

In the firmament, one of the most beautiful words in our vocabulary, refers to the starry sky that surrounds us. But etymologically it also refers to the stable character of all the luminaries, hence the expression “sphere of the fixed ones” was later used to refer to it. An example of the first is Miguel de Unamuno, with his poem “The Moon and the Rose”.

Palabras clave:

firmamento, estrellas, Aristóteles, Pitágoras, Platón, astronomía, luna, Tolomeo, astrolabio, globo terrestre, distancias estelares.

Keywords:

firmament, stars, Aristotle, Pythagoras, Platon, astronomy, moon, Ptolemy, astrolabe, globe, stellar distances.

El firmamento, una de las palabras más bonitas de nuestro vocabulario, hace mención al cielo estrellado que nos envuelve. Su aspecto es el de una bóveda continua salpicada de estrellas, tanto para el observador del hemisferio septentrional como del austral. Pero etimológicamente se refiere igualmente al carácter estable de todas las luminarias (*stellae fixae*), de ahí que para referirse a él se emplease después la expresión esfera de las fijas. El hombre curioso se ha sentido siempre extasiado, y hasta empequeñecido, cuando contemplaba durante la noche tan grandioso espectáculo, el propio Claudio Tolomeo afirmaba que cuando lo hacía se sentía saciado de ambrosia, el alimento de los dioses; no sorprende por tanto que se hayan inspirado en él poetas y pintores. Un ejemplo de los primeros es Miguel de Unamuno, con su poema La Luna y la rosa.

De entre los segundos parece obligado centrarse en tres de las obras de Vincent Van Gogh: La noche estrellada, Noche estrellada sobre el Ródano y La terraza de café por la noche. En la primera se muestran dos especies de nebulosas que interactúan, dando la sensación de movimiento, junto a once estrellas y la Luna menguante. La segunda es más apacible, con las estrellas rodeadas por su halo y una pareja paseando al lado del río Ródano. Finalmente en el tercero se representa el cielo nocturno, aunque las estrellas parecen jugar un papel más secundario.

Aunque aparentemente todas las estrellas parezcan estar a igual distancia de la Tierra, por estar situadas en esa hipotética esfera, realmente no es así: la visión que tenemos de todas ellas es la de su proyección sobre ella. Puede resultar un tanto sorprendente que se use el tiempo como escala para medir las distancias estelares, pero son estas de tal magnitud que resulta sumamente eficaz.

*En el silencio estrellado
la Luna daba a la rosa
y el aroma de la noche
le henchía -sedienta boca-
el paladar del espíritu,
que adurmiendo su congoja
se abría al cielo nocturno
de Dios y su Madre toda...*

*Toda cabellos tranquilos,
la Luna, tranquila y sola,
acariciaba a la Tierra
con sus cabellos de rosa
silvestre, blanca, escondida...*

*La Tierra, desde sus rocas,
exhalaba sus entrañas
fundidas de amor, su aroma ...*

La velocidad de la luz es del orden de los 300 000 km/s, de manera que podríamos decir que la Luna se encuentra a un segundo de la Tierra, puesto que la distancia media entre ambas es del orden de 384 000 km. En cambio deberíamos decir que el Sol está a unos ocho minutos de la Tierra, ya que su distancia media es de 150 millones de kilómetros¹, y al dividir esa cantidad por 300 000 resultaría 500, una cifra que casi coincide con los segundos a que equivalen los ocho minutos. La estrella más cercana al Sol es la Próxima Centauri, que se encuentra a poco más de cuatro años luz. La estrella polar en cambio está mucho más lejos, del orden de 434 años luz; es decir que la estamos viendo en el estado que tenía unos diez años antes de que concluyera el reinado de Felipe II.

El modelo de la esfera de las fijas ha estado vigente durante milenios, puesto que reflejaba perfectamente lo que apreciaba el observador sin oponerse a ningún resultado que probase lo contrario. Es más, cuando esto sucedió continuó siendo útil como instrumento

¹Esa cifra es muy relevante en la astronomía, de hecho es conocida como Unidad Astronómica. Es muy útil para medir distancias dentro del sistema solar.

*Entre las zarzas, su nido,
era otra luna la rosa,
toda cabellos cuajados
en la cuna, su corola;
las cabelleras mejidas
de la Luna y de la rosa
y en el crisol de la noche
fundidas en una sola...*

*En el silencio estrellado
la Luna daba a la rosa
mientras la rosa se daba
a la Luna, quieta y sola.*

didáctico para explicar los fundamentos de la astronomía de posición o geodésica. Como por otra parte permitía explicar otros fenómenos, se entiende que fuese adoptado por los filósofos más prestigiosos. Aristóteles la hizo suya para evitar tener que suponer que su velocidad de rotación tuviera que ser infinita. La



La noche estrellada



Noche estrellada sobre el Ródano

ausencia de paralaje² para las estrellas, la invariabilidad de las constelaciones, el periodo de rotación idéntico, eran argumentos que avalaban la idoneidad del modelo, en tanto que todas las estrellas se encontraban a la misma distancia. Por otro lado esa esfera debería estar mucho más alejada que las planetarias, habida cuenta de que las estrellas centellean y los planetas no, una conclusión a la que llegó Aristóteles en su obra «Del Cielo».

Lo cierto es que en los orígenes del pensamiento científico el modelo esférico acaba por imponerse como forma del universo y de la propia Tierra. Los protagonistas fueron los filósofos griegos posteriores al siglo VI a.C., aunque actuasen influenciados por el saber astronómico de Egipto y de Mesopotamia, es decir Tales de Mileto, Anaximandro, Pitágoras, Platón, Aristóteles, etc. Todos ellos admitían que la Tierra era asimismo el centro del cosmos, moviéndose alrededor de la misma una serie de esferas concéntricas relativas a los siete planetas: Luna, Mercurio, Venus, Sol, Marte, Júpiter y Saturno; la concepción no era nada casual, ya que respondía bien

²Se define la paralaje de una estrella como el ángulo bajo el que se vería desde ella el radio de la Tierra. En todos los supuestos sería nula. A esa paralaje, llamada diurna, se une otra denominada anual que también es despreciable para la mayoría de las estrellas (se define como el ángulo bajo el que se vería el radio vector Tierra Sol desde la estrella en cuestión).



Platón y Aristóteles en la Academia, obsérvese la esfera colocada en un soporte de madera. Mosaico de Pompeya. Se expone en el Museo Arqueológico Nacional de Nápoles.

a la observación de sus movimientos y a consideraciones filosóficas.

En esa misma época floreció en las ciudades jónicas y en los círculos pitagóricos, una nueva concepción del mundo despojada en gran medida de las limitaciones impuestas por los relatos mitológicos. La cual fue posible al haber constatado la existencia de movimientos cíclicos del cielo: trayectorias aparentes del Sol y de la Luna, orto y ocaso de las estrellas, eclipses solares o lunares; junto a una envidiable intuición matemática. Fue entonces cuando surgió la esfera como el sólido de la perfecta simetría, potencialmente animada de un movimiento circular inmutable.

Los artífices fueron Pitágoras, Platón, Aristóteles y sus discípulos del siglo IV, los cuales hicieron de ella la forma ideal para un cosmos, que imaginaron creado, en su verdadera proporción y armonía, por un geómetra o gran arquitecto, esto es por el Demiurgo.

A pesar de los modelos alternativos, sobre todo los heliocéntricos: primero de Heráclides Póntico (s. IV a. C.) y después de Aristarco de Samos (s. II a. C.), los fundamentos del modelo esférico planteados por los anteriores filósofos tomaron carta de naturaleza: la Tierra redonda e inmóvil localizada en el centro del universo, formado por esferas concéntricas sobre las que se localizaban las estrellas y los planetas, las cuales estaban animadas de un movimiento circular y uniforme. Es sorprendente la pervivencia del modelo griego, pues fue del todo incuestionable hasta que Copérnico formuló su hipótesis revolucionaria en el siglo XVI.

A raíz de ello proliferaron globos celestes y terrestres, esferas armilares o planetarias, y diversos instrumentos cosmográficos, que permitieron dar cuerpo a las diferentes teorías científicas que fueron surgiendo desde el siglo II a. C., empleándose tanto como instrumentos de observación, como de cálculo y demostración. Lamentablemente son muy pocos los que aún subsisten. Antes de que el repetido modelo esférico fuese

universalmente aceptado, continuó siendo el soporte de especulaciones filosóficas y metafísicas: la Tierra, como el universo, solo podían ser redondos por ser la esfera una forma perfecta; todo punto de su superficie dista lo mismo de su centro.

Al igual que Platón y Aristóteles definieron los grandes postulados del modelo esférico: una Tierra redonda e inmóvil en el centro y el movimiento circular y uniforme de los astros, Eudoxo de Cnido fue el primero en concebir un modelo matemático, apoyado en 27 esferas, que explicaba en su conjunto el movimiento de los cuerpos celestes; sus trabajos nos fueron transmitidos por poetas como Aratos de Soles y sabios posteriores, como Estrabón, Tolomeo o Macrobio. Realmente no se conserva ninguno de los textos griegos originales y solo se ha podido acceder a algunas de las copias de los mismos hechas en la Edad Media.

Esa concepción del mundo cerrado y compuesto de esferas concéntricas, sobre las que se situaban las estrellas fijas y los siete planetas, girando alrededor de la Tierra igualmente esférica e inmóvil, que ocupaba el centro de todas ellas, fue perfeccionado



La división de las esferas en la Cosmografía de Pedro Apiano (1574). En cada una de las siete planetarias figura el nombre y símbolo del planeta respectivo. Envuelto a la de Saturno aparece la de las estrellas fijas con el rótulo Octavum Firmamentu, estando la corona circular correspondiente dividida de acuerdo con los doce signos zodiacales.

en el siglo II de nuestra era por Claudio Tolomeo, el último sabio de la antigüedad. Suyas fueron las tres obras maestras en las que se sintetizaron los conocimientos cosmográficos del periodo grecorromano: el *Almagesto*, la *Geografía* y el *Tetrabiblos*. El

Almagesto expuso la mecánica celeste y dio un catálogo de 1 000 estrellas, agrupadas en 48 constelaciones, explicando además como se podía construir un globo celeste. La *Geografía* describió el ecúmene, esto es la parte habitada de la Tierra, dio las normas para fabricar un globo terrestre y para confeccionar mapas de acuerdo con varios sistemas cartográficos: representando parcialmente la esfera sobre un plano. El *Tetrabiblos* no fue más que un tratado de astrología en el que se analizaban las supuestas influencias astrales sobre el destino del hombre. Desde Bizancio fue transmitido su saber a los árabes y al occidente a través de las traducciones al latín realizadas en las escuelas de traductores, principalmente en la de Toledo; se obtuvo así una referencia que mediatizó el conocimiento cosmográfico de Europa durante quince siglos.

La esfera no tardó en proyectarse a la sociedad, fuera del reducido círculo de los filósofos, así como el interés por las cuestiones astronómicas. Buen testigo de ello es su presencia en la serie de estatuas, frescos, mosaicos, monedas y hasta en obras literarias como el *Sueño de Escipión*, escrita



Dos monedas del Emperador Augusto. En los dos casos figura el globo en el reverso, aunque en una de ellas aparece coronado por el ángel de la victoria.

por Cicerón en el año 54 a. C. En efecto, desde el año 75 a. C. comienzan a acuñarse monedas con la imagen del globo, el cual llegó a ser un atributo esencial del emperador Augusto, que denotaba su poder imperial y su ambición universal o cósmica. Dos son las representaciones más llamativas, por un lado la del Emperador que sostiene un globo en su mano, como soberano del mundo, y por otro la del Emperador acostumbrado a la Victoria, cuya imagen se sitúa sobre el globo para legitimar su poder. A partir de esa época, la esfera podía ir acompañada de otros elementos que matizaban su cometido: una lanza, como símbolo del poderío militar, o del fénix, el ave solar que renace de sus cenizas, una clara alegoría de la eternidad. Asimismo se contemplaron motivos parecidos en camafeos, como el del Triunfo de Licinio: mostrando al emperador, con globo y lanza, en una cuadriga tirada por cuatro caballos, mientras que dos victorias le hacen entrega de dos globos celestes; su victoria sobre los enemigos, aplastados por los caballos, fue asociada al dios Sol y a la luna, pareja de astros visibles día tras día que vienen a sugerir la eternidad de Roma y la aspiración de los emperadores a la divinidad.

Con el triunfo del cristianismo, el signo de la victoria es sustituido paulatinamente por la cruz, simbolizando la base divina del poder terrenal. En la iconografía religiosa no dejó de estar presente el globo, cruciforme o no, llegando después a incorporarle los tres continentes conocidos para formar el globo tripartito. El globo aparece junto a Jesucristo, como salvador del mundo, o junto a Dios padre, como creador del mismo; igualmente figura en numerosas esculturas con la Santísima Trinidad. En este último caso, fueron la transposición espacial del mapa de T en O con que iluminó San Isidoro Etimologías. Tales modelos grecorromanos del mundo se fueron extendiendo por toda la ribera del Mediterráneo, mediante globos y esferas que servían de soporte material a los conocimientos que se habían venido acumulando, aunque las especulaciones filosóficas o metafísicas también se



El Triunfo de Licinio (8,1 cm x 8,3 cm). Siglo IV. Biblioteca Nacional de Francia (Médailles et Antiques)

apoyasen en ellos.

Ese saber antiguo fue heredado y reinterpretado durante el Medievo en dos civilizaciones bien diferenciadas, pero obligadas a convivir: el mundo árabe musulmán y el Occidente cristiano, no en vano compartían ambas una misma realidad, la primacía de la astronomía sobre la geografía. La primera de las dos disciplinas fue muy cultivada en los países del Islam, como evidencia la cantidad de globos celestes que se construyeron a partir del siglo IX; fuertemente influenciados por las prácticas persas, indias y helenísticas sobre todo. Es sabido que tras la caída del Imperio de occidente (en el año 476), la ciencia grecorromana quedó enclaustrada en el Imperio de oriente y más concretamente en Bizancio. No obstante, parece incuestionable que su renacer solo fue posible gracias al interés por la ciencia que tuvieron los califas abasidas, ayudados en todo momento por los traductores siriacos. Fue así como se transmitió el saber de la antigüedad a la Casa de Sabiduría de Bagdad, asimilándose de inmediato y renovándolo con las aportaciones de los sabios que acudieron a la llamada del califa. Como era de esperar, el árabe se convirtió en el idioma con que se transmitiría el conocimiento.

Tanto el globo celeste como el astrolabio, una representación bidimensional del firmamento, fueron los instrumentos científicos por excelencia de esa civilización,

cuyo manejo se extendió a todas sus áreas de influencia, desde al Andalus a la India Mogol. Como era de esperar, los globos y los astrolabios, sobre todo, se convirtieron pronto en muestra de poder, siendo apreciados por príncipes y reyes más por sus deseos de ostentación que por su evidente valor artístico y simbólico. Ha de tenerse bien presente que su importancia para la ciencia islámica resultaba del todo obvia: el cumplir con los preceptos del Corán y la adivinación de las supuestas influencias estelares. Resulta pues que sin conocimientos astronómicos no se podían cumplir las obligaciones religiosas, de modo que era obligado estar al tanto del calendario lunar y saber cómo determinar las cinco horas de la oración, amén de la qibla u orientación de la Meca.

Para efectuar las observaciones astronómicas y realizar los cálculos pertinentes, los operadores de turno tenían que consultar permanentemente un listado con las estrellas localizadas en la esfera de las fijas. El libro de consulta más frecuentemente utilizado entre el colectivo musulmán fue el denominado

Libro de las estrellas fijas³, que publicó el astrónomo persa Abd Al-Rahman Al Sufi, hacia el año 964. Tuvo esta obra una interesante particularidad, la de presentar las estrellas de dos formas diferentes: como se verían sobre la concavidad del firmamento y tal como aparecerían sobre un globo celeste. Para cada una de las 48 constelaciones proporcionó una carta celeste que contenía a todas las estrellas que formaban parte de las mismas. En cada carta se identificaban las estrellas por su nombre y número, proporcionándose además su magnitud, y las coordenadas, latitud y longitud, con relación al sistema en el que su plano fundamental es el de la eclíptica. Aunque la influencia del Almagesto fuese evidente, el libro de al Sufi fue una de las obras más sobresalientes de la astronomía árabe, que fue profusamente consultada también en occidente a partir del siglo XI; como ocurrió con otros libros de ciencia que también fueron traducidos al latín.

Con la caída del imperio romano de occidente se produjo en Europa un

prolongado vacío cultural entre los siglos V y X, hasta que se crearon en Córdoba y Toledo las prestigiosas escuelas de traductores. Gracias a ellas llegaron a Occidente, a partir del siglo XI, numerosos textos antiguos de autores tan celebrados como Aristóteles, Euclides o Tolomeo, aparte de los de otros pensadores del Islam. Se produjo así un verdadero renacimiento científico que siempre conviene recordar, en tanto que surgieron de ese modo nuevas síntesis conceptuales que fueron adoptando los conocimientos antiguos a los dogmas cristianos. En lo que se refiere a la astronomía, es destacable el hecho de que las traducciones latinas del poema *Los fenómenos y los pronósticos* de Aratos de Solos, uno de los más leídos en la antigüedad después de la *Ilíada* y la *Odisea*, fueron la fuente primigenia en que se basaron las primeras cartas celestes dibujadas en nuestro continente, como sucedería también con los globos concebidos por Gerberto de Aurillac, el futuro papa Silvestre II, alrededor del año mil. Las traducciones al latín del Almagesto de Tolomeo y del Libro de las fijas de al Sufi, renovaron incuestionablemente la visión occidental del mundo. Todo parece señalar a que la asociación de las tradiciones grecorromanas y de las versiones árabes del Almagesto, dadas a conocer por los citados traductores sentó las bases necesarias para que en el siglo XV surgieran en occidente unas imágenes cartográficas del firmamento ciertamente originales.

Ello no es óbice para que algunos autores cristianos de la alta Edad Media dudasen de la redondez de la Tierra y de que esta estuviese situada en el centro de las esferas que conformaban el universo, si bien es cierto que dicho modelo no tardaría en ser adoptado por la mayoría de los clérigos. Con el renacimiento científico del siglo XII, las nuevas obras que fueron apareciendo sirvieron para afianzar ese principio. De entre ellas, merecen ser recordadas el *Liber floridus* de Lambert de Saint-Omer o el *Dragmaticon Philosophiae* de Guillaume de Conches. En el siglo siguiente se publican

³Kitab al-Kawatib al-Thabit al-Musawwar



Globo celeste de Ibn said, año 1080. Astrolabio con alidada, Toledo siglo XI.



La constelación de Pegaso en el Libro de Las Fijas. Pegaso era el caballo alado de Zeus, Dios del cielo y de la Tierra. Su estrella 51 Pegasi es orbitada por el primer planeta extra solar que fue descubierto (Dimidio); el anuncio se hizo en el año 1995.

ya algunos tratados de carácter didáctico, tales como *De sphaera mundi*, escrita por el

monje agustino John de Hollywood⁴, o bien la escrita en lengua vulgar del clérigo francés

⁽⁴⁾Más conocido por su nombre latino: Johannes Sacrobosco.



El modelo geocéntrico de Tolomeo en las Obras de Sacrobosco (i) y de Gaurier de Metz (d). Obsérvese que en ambos figura la octava esfera, salpicada de estrellas. La segunda imagen aparece coronada por una imagen de Jesucristo sosteniendo un globo tripartito y cruciforme.

Goussin de Metz: *L'Image du monde*, muy influenciada por la *Imago mundi* que había escrito el sacerdote y cosmógrafo alemán Honorio de Autun. Tuvieron que transcurrir dos siglos más para que apareciese la primera traducción latina de la *Geografía* de Tolomeo⁵, finalizada en Roma por Jacobus Angelus en el año 1406. A partir de entonces comenzó a vislumbrarse la existencia de un nuevo mundo, gracias a los primeros viajes exploratorios de españoles y portugueses, a la vez que se daban nuevas razones a los defensores de la esfericidad terrestre, que acabarían desembocando en la construcción de los primeros globos terrestres.

Sin embargo, se fueron modificando paulatinamente las primitivas hipótesis de los filósofos griegos al ser reinterpretadas de acuerdo con las principios innegables de la fe cristiana. Así el Demiurgo pasó a ser el Dios creador de todas las cosas que gobierna el conjunto de la «máquina del mundo», concebido, siguiendo el ejemplo de Aristóteles o de Tolomeo, como un conjunto de esferas concéntricas en cuyo centro se situaba la Tierra esférica e inmóvil. La diferencia principal con el sistema griego radicaba en la modificación de los extremos. Por una parte desaparecerían los cuatro elementos (tierra, agua, aire y fuego), incorporando un supuesto infierno colocado en el centro de la Tierra; y en el que frecuentemente se situaba un monstruo que devoraba a los condenados. Asimismo sería eliminada la esfera de las fijas, o la del «*primu mobile*» de Aristóteles, colocando en su lugar el emperio; la morada de Dios, de los ángeles y de los bienaventurados. Una concepción cristiana del mundo que fue representada en la extensa iconografía medieval.

Aunque el sacerdote polaco de Tórum,

⁽⁵⁾Uno de los acontecimientos más importantes para el comienzo de la geografía y de la cartografía moderna en Europa, poniendo a disposición de los estudiosos europeos el primer tratado de cartografía con una base matemática y astronómica, en palabras de Carmen Liter Mayayo (Bibliotecaria emérita de la Biblioteca Nacional de España y el *alma mater* de su excelente cartoteca).



Ángel con la esfera de las fijas. Placa 48: De los planetas y esferas. Series Tarocchi. 1465

Nicolás Copérnico, revolucionara la Astronomía con su modelo heliocéntrico del universo, aún limitaba la ampliación de este por la esfera de las fijas. Así lo hizo en su *De revolutionibus* (1543), numerando la última esfera de su esquema con el número I y rotulando sobre ella el texto siguiente: *Stellarum Locatum Sphaera Immobiles*. Cuando en 1661 se publicó el *Atlas Coelestis seu Harmonia Macrocosmica* de Andreas Cellarius con el grabado del sistema copernicano, sustituyó la esfera anterior por

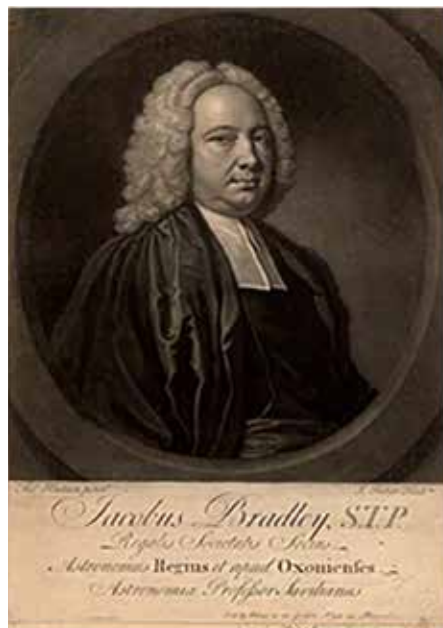


El sistema heliocéntrico de Copérnico, según Kepler, con su SPHAERA STELLAR FIXAR.

una corona circular subdividida por los doce signos del zodiaco. Unos años antes ya había publicado su sistema astronómico Tycho Brahe, una mezcla del sistema heliocéntrico de Copérnico y del geocéntrico de Tolomeo: la Tierra continuaba siendo el centro del universo, girando en torno a la misma el Sol y la luna, mientras que el resto de los planetas si giraban alrededor del Sol; pero el límite del cosmos continuaba siendo la esfera de las fijas. No obstante le cupo el honor de haber cuestionado la inmutabilidad aristotélica con la existencia de la supernova SN 1572 en la constelación de Casiopea. Fue Johannes Kepler quien con sus leyes rompió definitivamente con el geocentrismo, firme defensor de las tesis de Copérnico siguió manteniendo la esfera de las fijas como el límite del universo, llegando a incluir un cuidadoso dibujo de la misma en su obra *Mysterium Cosmographicum* (1596).

Hubo que esperar al siglo XVIII para que cambiase radicalmente el panorama, gracias a los trabajos del James Bradley, astrónomo real de Inglaterra entre 1742 y 1762. En efecto, tratando de hallar las paralajes de las estrellas llegó a la conclusión de que todas estaban tan alejadas que sus valores forzosamente

tendrían que ser pequeños. Gracias a sus estudios probó por primera vez la traslación de la Tierra alrededor del Sol y la existencia de la aberración de la luz, evidenciada por la finitud de la relación existente entre su velocidad y la de la traslación, y que se traducía en un pequeño cambio aparente en la posición de las estrellas por la repetida traslación terrestre. Ese descubrimiento genial lo comunicó a Edmund Halley, otro astrónomo igualmente brillante, en el documento siguiente: *A Letter from the reverend Mr. James Bradley, savilian Professor of Astronomy at Oxford. Reg.&c. giving an Account of a new discovered Motion of the Fix'd Stars* (1727-1728). Aunque ahí estuviese implícita la superación de la barrera que suponía la esfera de las fijas, aún quedaba pendiente la prueba definitiva. El encargado de ello fue el matemático Friedrich W. Bessel, el cual halló finalmente, en 1838, la paralaje de la estrella 61 Cygni, usando para ello el heliómetro diseñado por Joseph von Fraunhofer. Las medidas se realizaron en el Observatorio de Königsberg (actual Kaliningrado), probando definitivamente que las estrellas no están igualmente alejadas de nuestro sistema solar.



James Bradley y Friedrich Wilhelm Bessel, los dos astrónomos que abrieron las puertas del universo al superar la esfera de las fijas.

MAPS & CRAFTS



www.mapsandcrafts.com

info@mapsandcrafts.com

*Nuestra pasión es la Cartografía
y la artesanía hecha con ella*

Los drones escanean la intermareal de la Ría del Burgo para el comienzo de las obras de dragado

Durante varios días del mes de diciembre, los drones de la empresa AEROMEDIA han estado volando y haciendo trabajos de escaneo topográfico, en la Ría de O Burgo, en los Ayuntamientos de A Coruña, Oleiros, Cambre y Culleredo.

Para la realización de los mismos, se han empleado novedosas técnicas de escaneado con láser aéreo y fotogrametría, para realizar un seguimiento y control del dragado de los lodos que se encuentran en el estuario.

Gracias a estos vuelos, y a los que se realizarán durante la ejecución de los trabajos, se monitorizará, con precisión centimétrica, el control ambiental de las obras.

La combinación del LiDAR y la fotogrametría, son la solución ideal para este tipo de trabajos, acompañados de la toma de puntos de control a lo largo del perímetro de la obra.

Este tipo de actividades, conllevan



la dificultad añadida de ajustar los vuelos a las intensas bajamareas de esos días, con una coordinación estrecha entre el gestor de tránsito aéreo Saerco y la empresa operadora de los drones,

dada la proximidad del aeropuerto.

Además, estas actividades fueron supervisadas por el equipo de seguridad aérea de la policía nacional, con base en A Coruña.



Análisis de imágenes industriales agilizado gracias al aprendizaje profundo en inspecciones de materiales

Inteligencia artificial integrada en el software OLYMPUS Stream™ para ofrecer una segmentación de imágenes precisa y automatizada

WALTHAM, Massachusetts.

El software de análisis de imágenes OLYMPUS Stream™ ahora saca provecho del poder de la inteligencia artificial para implantar la segmentación de imágenes de última generación en las inspecciones microscópicas industriales. La versión 2.5 del software proporciona la tecnología de aprendizaje profundo TruAI™ de Olympus. Esta permite a los usuarios formar redes neuronales para segmentar y clasificar de forma automática objetos en imágenes microscópicas, procesadas a partir de una variedad de inspecciones de materiales. Asimismo, es posible aplicar una red neuronal formada en análisis posteriores cuando la aplicación es similar a fin de maximizar la eficiencia.

Segmentación precisa de imagen

El análisis de imágenes es una parte fundamental de muchas aplicaciones industriales, como la ciencia de materiales y el control/aseguramiento de calidad. La segmentación de imágenes, que usa métodos convencionales ba-

sados en el valor umbral, y depende de los espacios de color HSV o RGB, puede perder información u objetivos cruciales en las muestras. En cambio, la tecnología TruAI de Olympus ofrece una segmentación más precisa basada en el aprendizaje profundo para un análisis sólido y altamente reproducible.

Formar y administrar fácilmente redes neuronales

Con la solución TruAI, los usuarios pueden formar fácilmente redes neuronales sólidas. La interfaz fácil de usar permite a los usuarios marcar imágenes de manera eficiente y activar las formaciones por lotes. Las redes neuronales pueden ser configuradas con muchos canales de entrada, ser formadas para identificar hasta 16 clases, como también ser importadas o exportadas. La solución también ofrece opciones para revisar y editar los detalles de la formación.

Procesos de trabajo personalizados conforme al usuario

La actualización del software también proporciona a todos los usuarios acceso a los servicios de personalización para procesos de trabajo de Olympus. Este equipo diseña procesos de trabajo en el sistema OLYMPUS Stream a medida que se abordan los escenarios, desafíos y objetivos específicos del usuario.

Actualización del sistema OLYMPUS Stream a la versión 2.5

Los clientes del sistema OLYMPUS Stream pueden usar su licencia existente para una actualización gratuita del software a la versión 2.5.

Para obtener más información sobre el software de análisis de imágenes OLYMPUS Stream, visite Olympus-IMS.com/Microscope/Stream2.

Acerca de Olympus

Olympus se dedica con total fervor a crear soluciones orientadas al cliente para los sectores de la medicina, las ciencias de la vida y la instrumentación industrial. Por más de 100 años, Olympus se ha enfocado en hacer la vida de las personas más sana, más segura y gratificante a través de un trabajo sólido que ha permitido prevenir o tratar enfermedades, incentivar las investigaciones científicas y garantizar la seguridad pública.

Las soluciones industriales de Olympus van desde los microscopios industriales y videoscopios hasta la tecnología de ensayos no destructivos y analizadores de rayos X. Estos productos son usados ampliamente en aplicaciones de control y aseguramiento de calidad, inspección y medición. La tecnología de Olympus, que sirve al cliente en diversos campos como el de la fabricación, mantenimiento, medioambiente y recursos naturales, aporta calidad de productos y una seguridad incrementada en infraestructuras e instalaciones industriales.

Para obtener más información, visite www.olympus-ims.com.



Captura de imagen: El estudio multifásico de materiales compuestos es una aplicación típica cuyo análisis de imágenes industriales se sirve de la tecnología de aprendizaje profundo. Después de la segmentación de imágenes por medio del aprendizaje profundo con la versión 2.5 del software OLYMPUS Stream, es posible distinguir y detectar con precisión diferentes fases. Y, en combinación con la solución de conteo y medición (Count and Measure) del software, los usuarios pueden obtener fácilmente resultados cuantitativos y repetibles. Izquierda: Imagen original de cobre grabado. Centro: Segmentación de imagen mediante métodos convencionales basados en el valor umbral. Derecha: Segmentación de imagen por aprendizaje profundo.

Tecnología 3D para mejorar el mantenimiento de la flota aérea en el Ejército del Aire español

Desde hace algún tiempo la fabricación aditiva se ha utilizado en el sector aeronáutico y aeroespacial en todo tipo de aplicaciones, desde la creación de piezas hasta la fabricación de turbinas y motores más ligeros y eficientes. El uso de tecnologías 3D generalmente ayuda en el ahorro de tiempo y dinero mientras se crean productos terminados más fuertes y eficientes. Debido a los crecientes avances en áreas como la investigación de materiales, la fabricación aditiva en la industria aeronáutica ha crecido enormemente en los últimos años. Además, este método de producción permite geometrías complejas que no son posibles en la fabricación tradicional, donde las restricciones de costes siempre han sido un impedimento. Con esto en mente, el Ejército del Aire español, con ayuda de Sicnova, ha integrado la tecnología 3D para el desarrollo de piezas que mejoren el mantenimiento de la flota aérea.

Concretamente la tecnología 3D ha sido integrada por la Maestría Aérea de Madrid (MAESMA), un órgano perteneciente al Ejército del Aire Español encargado del mantenimiento de su flota de aviones y helicópteros. El organismo lleva varios meses desarrollando una sucesión de nuevas piezas y aplicaciones basadas en la tecnología de la denominada Industria 4.0, entre las que se encuentran la fabricación aditiva y la digitalización 3D. ¿La meta? Reducir los costes y tiempos de trabajo, así como la producción de útiles personalizados que resul-

tan muy difíciles de conseguir mediante procesos tradicionales.

El Ejército español integra la tecnología 3D

La exitosa experiencia previa de la MAESMA con este tipo de tecnologías ha sido el impulso definitivo para dar el salto al equipamiento 3D de nivel profesional. Alejandro Aracil, jefe del taller de helicópteros, destaca que desde hace varios años en el departamento de ingeniería ya existe el interés por incorporar la fabricación aditiva a los procesos de trabajo habituales. Gracias al asesoramiento ofrecido por el equipo de Sicnova, el organismo ha apostado finalmente por la adquisición de impresoras 3D industriales basadas en la tecnología de deposición de material fundido, plásticos reforzados internamente con fibras y escáneres 3D para la digitalización de modelos mediante luz estructurada. Aracil afirma que, en la actualidad, para cada necesidad de pieza, se prioriza el uso de la fabricación aditiva frente a la fabricación tradicional: «La tecnología de este tipo de fabricación aditiva en la Maestría Aérea de Madrid es básicamente el futuro», señala.

Entre las aplicaciones que más destacan, encontramos piezas de utillaje para la medición de control de fugas, lo cual ha permitido un ahorro de 25 horas de trabajo que se traduce en 10 000€ menos anuales. Otro ejemplo de herramienta impresa en 3D por MAESMA es una llave personalizada para el rotor



principal del helicóptero. En ambos casos se ha utilizado Onyx como material de fabricación y que se caracteriza por integrar micro partículas de carbono que aumentan la dureza y resistencia del plástico a la vez que mantiene la ligereza.

Por último, el organismo ha integrado la tecnología de digitalización 3D con el objetivo de escanear componentes de los aviones para poder replicar los modelos tridimensionales y, en algunos casos, fabricarlos con una impresora 3D. La principal ventaja de esta tecnología es la posibilidad de modificar diseños y tener un almacenamiento digital de piezas y repuestos difíciles de conseguir. Actualmente el departamento de Ingeniería de la MAESMA continúa con el desarrollo de nuevas piezas utilizando tanto fabricación aditiva como digitalización 3D, con el asesoramiento técnico y la formación de los especialistas de Sicnova.

Fuente: 3Dnatives

El Gran Reto SOLIDWORKS de Dassault Systèmes: un proyecto colaborativo para diseñar una estación espacial digital en solo 8 semanas

La iniciativa ha contado con participación española. Daniel García, Senior Technical Manager de 3DEXPERIENCE Works para España y Portugal, ha sido el líder de uno de los equipos de trabajo

Una estación espacial diseñada y creada a escala en tiempo récord, utilizando la última tecnología disponible: ése era el objetivo del Gran Reto, un ambicioso proyecto de Dassault Systèmes que consistía en utilizar su plataforma 3DEXPERIENCE para demostrar que el futuro está en el trabajo colaborativo en la nube y la habilidad de los gemelos virtuales para transformar el diseño industrial.

En ocho semanas, más de 500 empleados de Dassault Systèmes, pertenecientes al equipo de su marca SOLIDWORKS y ubicados en distintas partes del mundo, colaboraron simultáneamente en la plataforma 3DEXPERIENCE para desarrollar una estación espacial desde cero, diseñar sus componentes y fabricarla a escala. Esta tarea descomunal ha sido posible sólo gracias a la minuciosa organización y coordinación de estos empleados, quienes se organizaron en 50 equipos diferentes, cada uno de los cuales tenía una misión específica, para crear el modelo de esta estación espacial y diseñarla con todo lo necesario para hacer viable el proyecto. La iniciativa también ha contado con participación española, en concreto, la de Daniel García, Senior Technical Manager de 3DEXPERIENCE Works para España y Portugal, quien lideró uno de los equipos de trabajo.

El resultado ha sido una estación espacial de 2,2 kilómetros de largo y 800 metros de diámetro. Más de 10 000 piezas únicas, como sistemas de

soporte vital, zonas de recreo, sistemas de proporción de comida y plantas de procesamiento de residuos. El equipo del proyecto ha sido también muy diverso, con diferentes grados de experiencia, desde veteranos con muchos años de experiencia y numerosos proyectos a sus espaldas, hasta neófitos que estaban aprendiendo a utilizar las aplicaciones CAD por primera vez y nunca habían diseñado nada antes, demostrando la versatilidad y facilidad de uso del portafolio de soluciones de 3DEXPERIENCE.

Una vez que el modelo estuvo diseñado por completo en 3D, los equipos procedieron a crear una maqueta a escala real. Gracias a la ayuda de Dimensional Innovations, empresa con una larga relación de colaboración con Dassault Systèmes, se pudo construir una estación espacial de 2 metros siguiendo las instrucciones de los gemelos virtuales e incorporando todos los detalles existentes. Adicionalmente, se incorporó también un sistema de exposición rotativo, para demostrar cómo se comportaría la estación en el espacio. En total, un modelo real en el que profesionales de la industria del metal, de la maquinaria CNC, de la impresión 3D de última generación, de electrónica, iluminación, pinturas especiales... han estado involucrados.

Esta coordinación, primero en la creación del modelo virtual y, después,



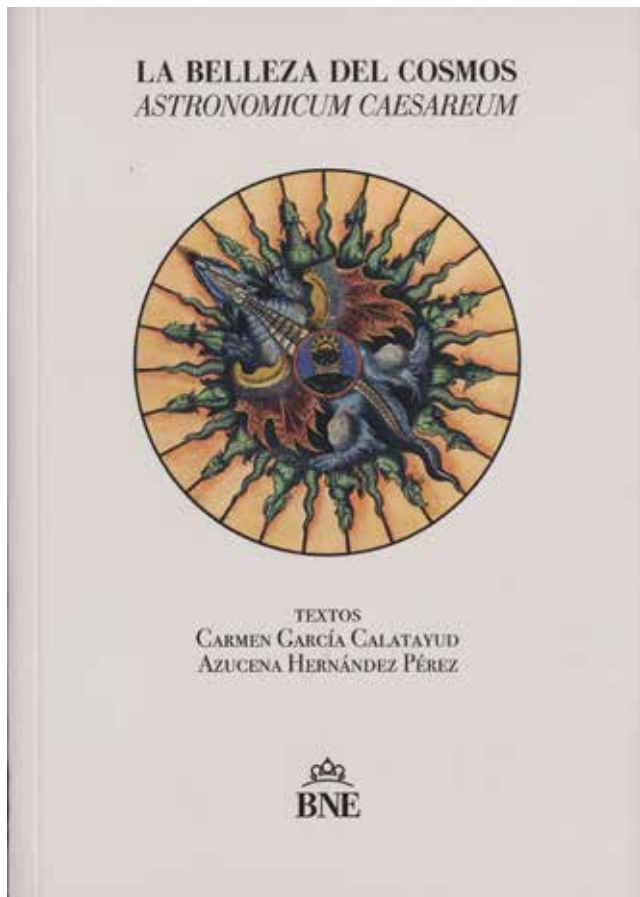
en su fabricación a escala no hubiera sido posible sin las soluciones adecuadas. Las aplicaciones de SOLIDWORKS permiten el trabajo colaborativo en la nube de diferentes profesionales, lo que quiere decir que cualquier *hardware* es válido para trabajar en los proyectos y que varias personas pueden trabajar en los gemelos virtuales de forma simultánea, mientras observan los resultados en tiempo real, comprobando asimismo cómo sus cambios pueden afectar al proyecto en su globalidad.

Además, que los miembros del equipo provengan de distintas disciplinas, también ha incentivado la creatividad y la innovación, generando nuevas dinámicas de trabajo y haciendo válido el eslogan de este Gran Reto: «Cualquiera puede ser un creador».

Para más información, tiene a su disposición el vídeo del proyecto: <https://www.youtube.com/watch?v=HEDSZJ58BtA>

Fuente: ATREVIA* (en nombre de Dassault Systèmes)

Reseña libro **Astronomicum Caesareum**



Con el título *La belleza del Cosmos. Astronomicum caesareum* se presenta el libro escrito por Carmen García Calatayud y Azucena Hernández Pérez y publicado por la Biblioteca Nacional de España dentro de la colección «Tesoros de la BNE». El volumen ofrece un estudio pormenorizado de la obra de Petrus Apianus *Astronomicum caesareum* de la que se conservan pocos ejemplares en el mundo y de los cuales la BNE custodia tres.

Se publicó en 1540 y está dedicada al emperador Carlos V, se considera uno de los libros impresos más espectaculares del siglo XVI, una obra maestra de la imprenta y una verdadera obra de arte por el cuidado de su impresión y por la calidad de sus ilustraciones, siendo el trabajo astronómico más importante antes de la edición del trabajo de Nicolás Copérnico «*De Revolutionibus orbium coelestium*» (1543).

Esta magnífica obra, explica el uso del astrolabio y otros instrumentos utilizados para calcular la posición de los planetas. Para ello, Apianus recurrió al diseño de discos móviles de pa-

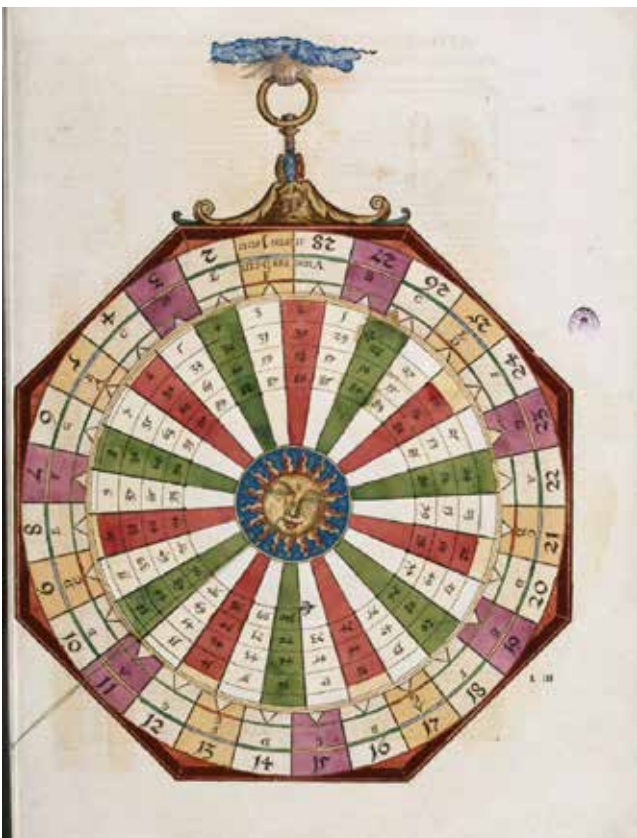
pel coloreados a mano, que crean impresionantes ilustraciones simulando verdaderos astrolabios, lo que constituye el aspecto más llamativo de la obra.

Además, nos abre las puertas a las investigaciones y descubrimientos realizados por Apianus, al mundo de la imprenta y de los impresores y al estudio de la astronomía y la astrología. El libro *La belleza del Cosmos* está dividido en dos partes, en la primera se expone la vida y trabajos científicos de Apianus, enriquecido con información sobre el contexto histórico en el que vivió, el siglo XVI, y que nos aporta luz sobre su forma de ser y de pensar.

Además, se completa con un estudio muy detallado de su obra cumbre, *Astronomicum caesareum*, analizado desde tres puntos de vista, la impresión, el arte y la ciencia.

La segunda parte del libro presenta un estudio pormenorizado y explicativo del funcionamiento de cada uno de los discos móviles incluidos en el libro, así como del *Torquetum*, un instrumento considerado una evolución del astrolabio.





Reseña libro España en mapas antiguos. Catálogo de la colección Rodríguez Torres-Ayuso

El libro de Carmen Manso está dividido en dos tomos. El tomo I reúne mapas generales de España y los de las regiones históricas. El tomo II es más variado: reúne mapas, planos y estampas de vistas de ciudades, heráldica, etc. de territorios que en algún momento formaron parte de la monarquía hispánica desde el siglo XV al XIX.

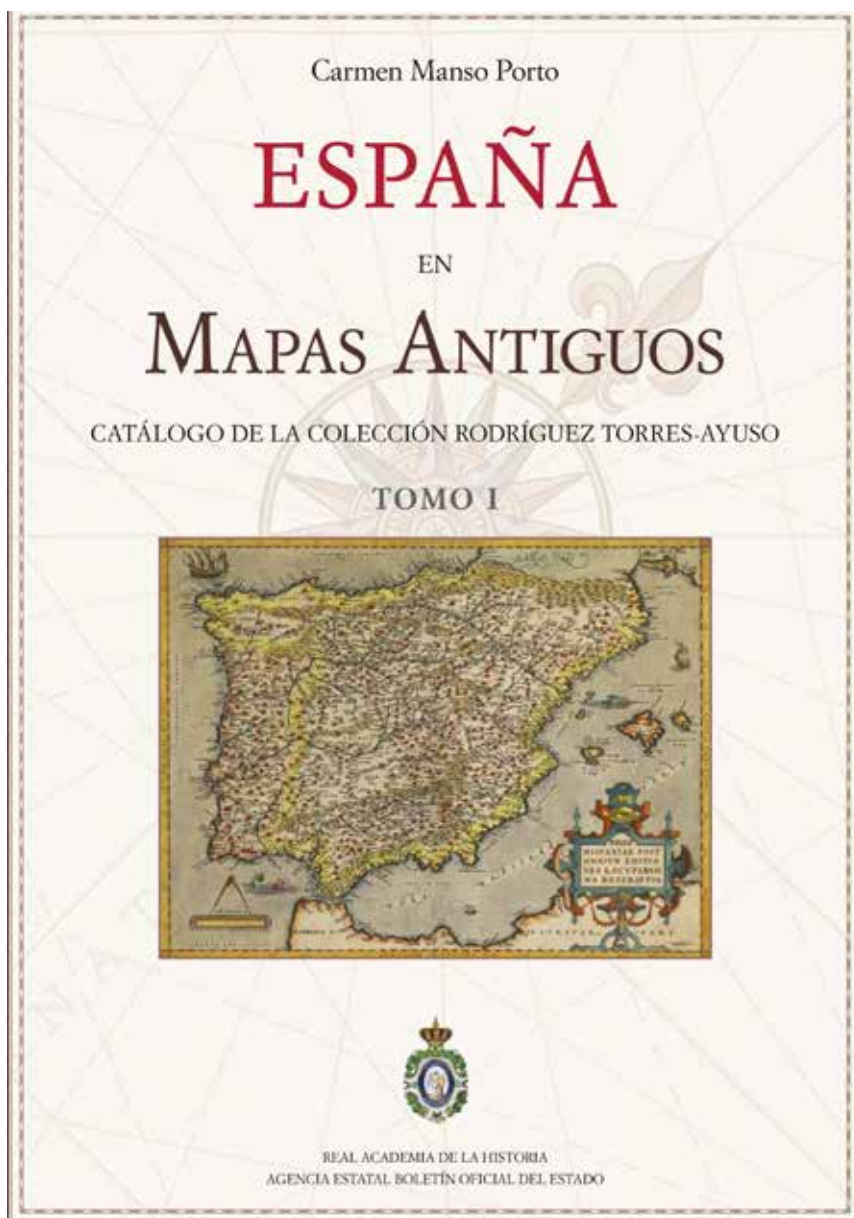
La colección de mapas antiguos de Rodríguez Torres-Ayuso fue donada a la Real Academia de la Historia en 2016, recopilada por el barcelonés don Antonio Rodríguez Torres, catedrático de Microbiología de la Universidad de Valladolid desde 1972 hasta su jubilación, y miembro de la Real Academia de Medicina y Cirugía de dicha ciudad.

Está formada por 321 mapas de España entre los siglos XV al XIX, fruto de su afición por la cartografía histórica, lo que le permitió convertirse en un experto comprador de originales, en sus frecuentes visitas a las librerías de anticuarios especializadas, en España y en sus viajes al extranjero.

El catálogo es muy exhaustivo en cuanto a identificación de autor, fecha, edición y localización geográfica (autoridades geográficas, autoridades de materia, etc.), catalogación con normativa internacional. Un gran trabajo de investigación en la explicación de cada mapa con imágenes en alta calidad que aumentan el atractivo estético del libro.

El libro va destinado a un amplio abanico de especialistas, coleccionistas, aficionados, bibliófilos, investigadores, archiveros, bibliotecarios, etc.

El estudio histórico realizado sobre la evolución de la imagen de España desde sus orígenes hasta el siglo XIX es muy interesante y didáctico, ilustrado especialmente con imágenes de la Real Academia de la Historia.



Manso Porto, Carmen. *España en mapas antiguos. Catálogo de la colección Rodríguez Torres-Ayuso*, Madrid: Real Academia de la Historia, Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado, 2021, 2 Tomos, Páginas: 748 (tomo I: 440; tomo II: 308). ISBN: 9788434027398. Encuadernación: Tapa dura. Formato: 240 x 330 cm



TRIMBLE SX10

Estación Robótica 1"
1mm EDM con imagen.

Escáner de hasta
600 metros de alta
velocidad.



- Distribuidor de Trimble Geospatial, Spectra Precision, Trimble Intech exclusivo España y Portugal
- Laboratorio máster de referencia Trimble España
- Desarrolladores oficiales de aplicaciones personalizadas Trimble
- Alquileres en península, Baleares y Canarias

1. Información general

MAPPING es una revista técnico-científica que tiene como objetivo la difusión y enseñanza de la Geomática aplicada a las Ciencias de la Tierra. Ello significa que su contenido debe tener como tema principal la Geomática, entendida como el conjunto de ciencias donde se integran los medios para la captura, tratamiento, análisis, interpretación, difusión y almacenamiento de información geográfica, y su utilización en el resto de Ciencias de la Tierra. Los trabajos deben tratar exclusivamente sobre asuntos relacionados con el objetivo y cobertura de la revista.

Los trabajos deben ser originales e inéditos y no deben estar siendo considerados en otra revista o haber sido publicados con anterioridad. MAPPING recibe artículos en español y en inglés. Independientemente del idioma, todos los artículos deben contener el título, resumen y palabras claves en español e inglés.

Todos los trabajos seleccionados serán revisados por los miembros del Consejo de Redacción mediante el proceso de «Revisión por pares doble ciego».

Los trabajos se publicarán en la revista en formato papel (ISSN: 1131-9100) y en formato electrónico (eISSN: 2340-6542).

Los autores son los únicos responsables sobre las opiniones y afirmaciones expresadas en los trabajos publicados.

2. Tipos de trabajos

- **Artículos de investigación.** Artículo original de investigaciones teóricas o experimentales. La extensión no podrá ser superior a 8000 palabras incluyendo resumen, tablas y figuras, con un máximo de 40 referencias bibliográficas. Cada tabla o figura será equivalente a 100 palabras. Tendrá la siguiente estructura: título, resumen, palabras clave, texto (introducción, material y método, resultados, discusión y conclusiones), agradecimientos y bibliografía.
- **Artículos de revisión.** Artículo detallado donde se describe y recopila los desarrollos más recientes o trabajos publicados sobre un determinado tema. La extensión no podrá superar las 5000 palabras, incluyendo resumen, tablas y figuras, con un máximo de 25 referencias bibliográficas.
- **Informe técnico.** Informe sobre proyectos, procesos, productos, desarrollos o herramientas que no supongan investigación propia, pero que sí muestren datos técnicos interesantes y relevantes. La extensión máxima será de 3000 palabras.

3. Formato del artículo

El formato del artículo se debe ceñir a las normas expuestas a continuación. Se recomienda el uso de

la plantilla «Plantilla Texto» y «Recomendaciones de estilo». Ambos documentos se pueden descargar en la web de la revista.

- A. Título.** El título de los trabajos debe escribirse en castellano e inglés y debe ser explícito y preciso, reflejando sin lugar a equívocos su contenido. Si es necesario se puede añadir un subtítulo separado por un punto. Evitar el uso de fórmulas, abreviaturas o acrónimos.
- B. Datos de contacto.** Se debe incluir el nombre y 2 apellidos, la dirección, el correo electrónico y el organismo o centro de trabajo. Para una comunicación fluida entre la dirección de la revista y las personas responsables de los trabajos se debe indicar la dirección completa y número de teléfono de la persona de contacto.
- C. Resumen.** El resumen debe ser en castellano e inglés con una extensión máxima de 200 palabras. Se debe describir de forma concisa los objetivos de la investigación, la metodología empleada, los resultados más destacados y las principales conclusiones.
- D. Palabras clave.** Se deben incluir de 5-10 palabras clave en castellano e inglés que identifiquen el contenido del trabajo para su inclusión en índices y bases de datos nacionales e internacionales. Se debe evitar términos demasiado generales que no permitan limitar adecuadamente la búsqueda.
- E. Texto del artículo de investigación.** La redacción debe ser clara y concisa con la extensión máxima indicada en el apartado «Tipos de trabajo». Todas las siglas citadas deben ser aclaradas en su significado. Para la numeración de los apartados y subapartados del artículo se deben utilizar cifras arábigas (1. Título apartado; 1.1. Título apartado; 1.1.1. Título apartado). La utilización de unidades de medida debe seguir la normativa del Sistema Internacional.

El contenido de los artículos de investigación puede dividirse en los siguientes apartados:

- **Introducción:** informa del propósito del trabajo, la importancia de éste y el conocimiento actual del tema, citando las contribuciones más relevantes en la materia. No se debe incluir datos o conclusiones del trabajo.
- **Material y método:** explica cómo se llevó a cabo la investigación, qué material se empleó, qué criterios se utilizaron para elegir el objeto del estudio y qué pasos se siguieron. Se debe describir la metodología empleada, la instrumentación y sistemática, tamaño de la muestra, métodos estadísticos y su justificación. Debe presentarse de la forma más conveniente para que el lector comprenda el desarrollo de la investigación.

- **Resultados:** pueden exponerse mediante texto, tablas y figuras de forma breve y clara y una sola vez. Se debe resaltar las observaciones más importantes. Los resultados se deben expresar sin emitir juicios de valor ni sacar conclusiones.
- **Discusión:** en este apartado se compara el estudio realizado con otros que se hayan llevado a cabo sobre el tema, siempre y cuando sean comparables. No se debe repetir con detalle los datos o materiales ya comentados en otros apartados. Se pueden incluir recomendaciones y sugerencias para investigaciones futuras.
En algunas ocasiones se realiza un único apartado de resultados y discusión en el que al mismo tiempo que se presentan los resultados se va discutiendo, comentando o comparando con otros estudios.
- **Conclusiones:** puede realizarse una numeración de las conclusiones o una recapitulación breve del contenido del artículo, con las contribuciones más importantes y posibles aplicaciones. No se trata de aportar nuevas ideas que no aparecen en apartados anteriores, sino recopilar lo indicado en los apartados de resultados y discusión.
- **Agradecimientos:** se recomienda a los autores indicar de forma explícita la fuente de financiación de la investigación. También se debe agradecer la colaboración de personas que hayan contribuido de forma sustancial al estudio, pero que no lleguen a tener la calificación de autor.
- **Bibliografía:** debe reducirse a la indispensable que tenga relación directa con el trabajo y que sean recientes, preferentemente que no sean superiores a 10 años, salvo que tengan una relevancia histórica o que ese trabajo o el autor del mismo sean un referente en ese campo. Deben evitarse los comentarios extensos sobre las referencias mencionadas.
Para citar fuentes bibliográficas en el texto y para elaborar la lista de referencias se debe utilizar el formato APA (*American Psychological Association*). Se debe indicar el DOI (*Digital Object Identifier*) de cada referencia si lo tuviera. Utilizar como modelo el documento «**Como citar bibliografía**» incluido en la web de la revista. La exactitud de las referencias bibliográficas es responsabilidad del autor.
- **Currículum:** se debe incluir un breve Currículum de cada uno de los autores lo más relacionado con el artículo presentado y con una extensión máxima de 200 palabras.

En los **artículos de revisión e informes técnicos** se debe incluir título, datos de contacto, resumen y palabras claves, quedando el resto de apartados a

consideración de los autores.

F. Tablas, figuras y fotografías. Se deben incluir solo tablas y figuras que sean realmente útiles, claras y representativas. Se deben numerar correlativamente según la cita en el texto. Cada figura debe tener su pie explicativo, indicándose el lugar aproximado de colocación de las mismas. Las tablas y figuras se deben enviar en archivos aparte, a ser posible en fichero comprimido. Las fotografías deben enviarse en formato JPEG o TIFF, las gráficas en EPS o PDF y las tablas en Word, Excel u Open Office. Las fotografías y figuras deben ser diseñadas con una resolución mínima de 300 pixel por pulgada (ppp).

G. Fórmulas y expresiones matemáticas. Debe perseguirse la máxima claridad de escritura, procurando emplear las formas más reducidas o que ocupen menos espacio. En el texto se deben numerar entre corchetes. Utilizar editores de fórmulas o incluirlas como imagen.

4. Envío

Los trabajos originales se deben remitir preferentemente a través de la página web <http://www.revistamapping.com> en el apartado «**Envío de artículos**», o mediante correo electrónico a info@revistamapping.com. El formato de los archivos puede ser Microsoft Word u Open Office y las figuras vendrán numeradas en un archivo comprimido aparte.

Se debe enviar además una copia en formato PDF con las figuras, tablas y fórmulas insertadas en el lugar más idóneo.

5. Proceso editorial y aceptación

Los artículos recibidos serán sometidos al Consejo de Redacción mediante «**Revisión por pares doble ciego**» y siguiendo el protocolo establecido en el documento «**Modelo de revisión de evaluadores**» que se puede consultar en la web.

El resultado de la evaluación será comunicado a los autores manteniendo el anonimato del revisor. Los trabajos que sean revisados y considerados para su publicación previa modificación, deben ser devueltos en un plazo de 30 días naturales, tanto si se solicitan correcciones menores como mayores.

La dirección de la revista se reserva el derecho de aceptar o rechazar los artículos para su publicación, así como el introducir modificaciones de estilo comprometiéndose a respetar el contenido original.

Se entregará a todos los autores, dentro del territorio nacional, la revista en formato PDF mediante enlace descargable y 1 ejemplar en formato papel. A los autores de fuera de España se les enviará la revista completa en formato electrónico mediante enlace descargable.

Suscripción a la revista MAPPING

Subscriptions and orders

Datos del suscriptor / Customer details:

Nombre y Apellidos / Name and Surname: _____
Razón Social / Company or Institution name: _____ NIF-CIF / VAT Number: _____
Dirección / Street address: _____ CP / Postal Code: _____
Localidad / Town, City: _____ Provincia / Province: _____
País - Estado / Country - State: _____ Teléfono / Phone: _____
Móvil / Mobile: _____ Fax / Fax: _____
e-mail: _____ Fecha / Order date: ____/____/____

PAPEL

SUSCRIPCIÓN ANUAL / SUBSCRIPTION:

- España / Spain : 60€
- Europa / Europe: 90€
- Resto de Países / International: 120€

Precios de suscripción por año completo 2020 (6 números por año) Prices year 2020 (6 issues per year)

NÚMEROS SUELTOS / SEPARATE ISSUES:

- España / Spain : 15€
- Europa / Europe: 22€
- Resto de Países / International: 35€

Los anteriores precios incluyen el IVA. Solamente para España y países de la UE The above prices include TAX Only Spain and EU countries

DIGITAL

SUSCRIPCIÓN ANUAL / ANNUAL SUBSCRIPTION:

- Internacional / International : 25€

Precios de suscripción por año completo 2020 (6 números por año) en formato DIGITAL y enviado por correo electrónico / Prices year 2020 (6 issues per year)

NÚMEROS SUELTOS / SEPARATE ISSUES:

- Internacional / International : 8€

Los anteriores precios incluyen el IVA. Solamente para España y países de la UE The above prices include TAX Only Spain and EU countries

Forma de pago / Payment:

Transferencia a favor de eGeoMapping S.L. al número de cuenta CAIXABANK, S.A.:

2100-1578-31-0200249757

Bank transfer in favor of eGeoMapping S.L., with CAIXABANK, S.A.:

IBAN nº: ES83-2100-1578-3102-0024-9757 (SWIFT CODE: CAIXAESBXXX)

Distribución y venta / Distribution and sale:

Departamento de Publicaciones de eGeoMapping S.L.

C/ Arrastaria 21. 28022-Madrid

Tels: (+34) 91 006 72 23; (+34) 655 95 98 69

e-mail: info@revistamapping.com

www.revistamapping.com

Firma _____

CONTIGO TODO EL CAMINO



PLANIFICACIÓN > PROSPECCIÓN > DISEÑO > ORGANIZACIÓN > EJECUCIÓN > INSPECCIÓN

Sea cual sea el tipo de proyecto, el tamaño de su empresa o la aplicación específica, ponemos a su disposición una amplia gama de soluciones de medición y posicionamiento de precisión para satisfacer sus necesidades.

Descubra lo que otros profesionales como usted están logrando con la tecnología de Topcon.

topconpositioning.com/es-es/insights

MINISTERIO DE TRANSPORTE, MOVILIDAD Y AGENDA URBANA
INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL
CENTRO NACIONAL DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

cartografía digital

www.ign.es



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

INSTITUTO
GEOGRÁFICO
NACIONAL



Oficina central y comercialización:
General Ibáñez de Ibero, 3 • 28003 MADRID
Teléfono: +34 91 597 94 15 • Fax: +34 91 553 29 13
e-mail: consulta@cniq.es

CENTRO DE DESCARGAS DE DATOS

<http://centrodedescargas.cniq.es/CentroDescargas/index.jsp>

BASE CARTOGRÁFICA NUMÉRICA (BCN 1000, 50, 200, 25),

MAPA TOPOGRÁFICO NACIONAL (MTN50,25),

MODELO DIGITAL DEL TERRENO (MDT1000, 200, 25),

LÍNEAS LÍMITE, BASE DE DATOS DE POBLACIÓN, MAPA DE USOS DEL SUELO,

ATLAS NACIONAL DE ESPAÑA, CARTOGRAFÍA TEMÁTICA.



Instituto Geográfico
Nacional 1870 · 2020