



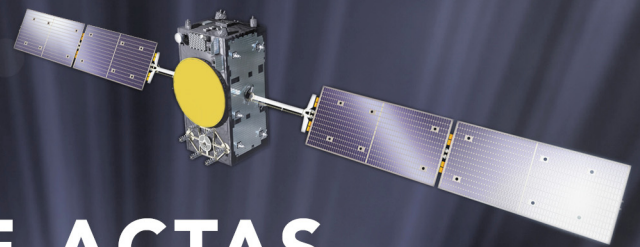
Universidad Politécnica de Valencia
Universidad Politécnica de Madrid



PRIMER CONGRESO EN INGENIERÍA GEOMÁTICA

CIGeo

Valencia, 4-5 de Julio de 2017



LIBRO DE ACTAS

Modelización y Geo-computación
Geodesia y Geofísica
Observación del Territorio, Cartografía
y Aplicaciones Medioambientales

Congresos UPV

Primer Congreso en Ingeniería Geomática - **CIGeo**

Los contenidos de esta publicación han sido evaluados por el Comité Científico que en ella se relaciona y según el procedimiento que se recoge en <http://ocs.editorial.upv.es/index.php/CIGeo/CIGeo2017>

© Editor científico

Martín Furones, A.

© de los textos: los autores

© 2017, de la presente edición: Editorial Universitat Politècnica de València.

www.lalibreria.upv.es Ref.: 6360_01_01_01

ISBN: 978-84-9048-669-6

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/CIGeo2017.2017.7176>



Primer Congreso en Ingeniería Geomática - CIGeo

Se distribuye bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional. Basada en una obra en <http://ocs.editorial.upv.es/index.php/CIGeo/CIGeo2017>

Introducción

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

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

Comité organizador.

Comités del congreso

Comité Organizador

- Jorge Padín Devesa. *Director del Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, UPV*
- Jesús Velasco Gómez. *Director de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía, UPM*
- José Luis Lerma García. *Coordinador del programa de doctorado en ingeniería Geomática, UPV*
- Belén Benito Oterino. *Coordinadora de la comisión académica UPM del programa de doctorado en ingeniería Geomática, UPM*
- Ángel Martín Furones. *Subdirector de Investigación del Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, UPV*
- Iñigo Molina Sánchez. *Subdirector de Investigación, Postgrado y Doctorado de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía, UPM*

Comité Científico

- Álvarez Taboada, M.F. (*U. León*)
- Benito Oterino, B. (*UPM*)
- Berné Valero, J.L. (*UPV*)
- Farjas Abadía, M. (*UPM*)
- Fernández Torres, J. (*CSIC*)
- García Meléndez, E. (*U. León*)
- González Aguilera, D. (*U. Salamanca*)
- Lerma García, J.L. (*UPV*)
- Manso Callejo, M.A. (*UPM*)
- Martín Furones, A. (*UPV*)
- Martínez Llario, J.C. (*UPV*)
- Núñez Andrés, A. (*UPC*)
- Pardo Pascual, J.E. (*UPV*)

Editor Científico: Martín Furones, A.

Revisores Científicos

- Álvarez Taboada, M.F. (*U. León*)
- Aguirre de Mata, J. (*UPM*)
- Almonacid Caballer, J. (*UPV*)
- Álvarez Taboada, M.F. (*U. León*)
- Anquela Julián, A.B. (*UPV*)
- Arranz Justel, J.J. (*UPM*)
- Benito Oterino, B. (*UPM*)
- Buill Pozuelo, F. (*UPC*)
- Cardenal Escarcena, F.J. (*U. Jaén*)
- Chica Olmo, M. (*U. Granada*)
- Coll Aliaga, E. (*UPV*)
- De Sanjosé Blasco, J.J. (*U. Extremadura*)
- Del Pozo Aguilera, S. (*U. Salamanca*)
- Farjas Abadía, M. (*UPM*)
- Femenia Ribera, C. (*UPV*)
- Ferrer Julià, M. (*U. León*)
- García Meléndez, E. (*U. León*)
- García Pallero, J.L. (*UPM*)
- Garrido Villén, N. (*UPV*)
- Gaspar Escribano, J.M. (*UPM*)
- Gómez Lahoz, J. (*U. Salamanca*)
- González Aguilera, D. (*U. Salamanca*)
- Lerma García, J.L. (*UPV*)
- Maldonado Ibáñez, A. (*IGN*)
- Manso Callejo, M.A. (*UPM*)
- Martín Furones, A. (*UPV*)
- Martínez Graña, A. (*U. Salamanca*)
- Martínez Llario, J.C. (*UPV*)
- Martínez Peña, M. (*UPM*)
- Maximiliano Castillejo, A. (*UAB*)
- Molina Gómez, I. (*UPM*)
- Molina Palacios, S. (*U. Alicante*)
- Moreno Regidor, M.P. (*UPM*)
- Núñez Andrés, A. (*UPC*)
- Ormeño Villajos, S. (*UPM*)
- Padín Devesa, J. (*UPV*)
- Pardo Pascual, J.E. (*UPV*)
- Pérez Gómez, R. (*UPM*)
- Réyes Núñez, J. (*ELTE University*)
- San Román Rodríguez, J.M. (*U. León*)
- Sánchez Aparicio, L.J. (*U. Salamanca*)
- Tarrío Mosquera, J.A. (*U. Santiago de Chile*)

Patrocinadores del Congreso

- AL-TOP Topografía
- Colegio Oficial de Ingenieros en Geomática y Topografía. Delegación de Valencia y Murcia
- ESRI
- FARO
- GVSIG
- Institut Cartogràfic Valencià
- LEICA Geosystems
- TOPCON
- TRIMBLE

Entidades colaboradoras en el programa de doctorado

- Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya
- CSIC
- GeoNumerics
- Institut Cartogràfic Valencià
- Instituto Geográfico Nacional
- LEICA Geosystems
- TOPCON
- TRIMBLE

Índice

Geocomputación, Modelado y Patrimonio

DIFUSIÓN DEL ARTE RUPESTRE A TRAVÉS DE APLICACIONES MÓVILES DE REALIDAD AUMENTADA: UN ENFOQUE PRÁCTICO

Blanco-Pons, S., Lerma, J.L.

DIFERENTES PAISAJES Y ANÁLOGAS REPRESENTACIONES. INTERPRETACIÓN ARQUEOLÓGICA CON TECNOLOGÍAS DE INGENIERÍA INVERSA

Otero, X., Farjas, M., Santos, M., Angás, J.

ANÁLISIS DE REPETIBILIDAD EN VIDEOGRAMETRÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA DEFORMACIÓN CRANEAL EN NIÑOS

Barbero-García, I., Lerma, J.L., Marqués, A., Miranda, P.

VIABILIDAD Y OPERATIVA EN LA DIGITALIZACIÓN DE CASOS RUPESTRES PREHISTÓRICOS DEL “ARTE SUREÑO”: RECETAS DIGITALES DESDE TÉCNICAS SFM Y PLATAFORMAS OPEN SOURCE

Maximiliano, A.M., Barcia, C.

PROCESAMIENTO AUTOMATIZADO DE MODELOS TRIDIMENSIONALES DE ÚLCERAS CUTÁNEAS

Sánchez-Jiménez, D., Buchón-Moragues, F., Palomar-Vázquez, J., Peris-Fajarnés, G.

DETERMINACIÓN DE TRAYECTORIAS DE BLOQUES ROCOSOS EN ENSAYOS MEDIANTE VIDEOGRAMETRÍA

Prades, A., Matas, G., Núñez-Andrés, A., Buill, F., Lantada, N., Corominas, J.

ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES EN EL ÁMBITO DEL ARTE RUPESTRE

Carrión-Ruiz, B., Lerma, J.L.

DESARROLLO DE SOFTWARE PARA EL TRATAMIENTO DE DATOS COLORIMÉTRICOS Y ESPECTRALES: PYCOLOURIMETRY

Molada-Tebar, A., Lerma, J.L., Marqués, A.

DOCUMENTACIÓN 3D DE LA COVA DELS CAVALLS Y SU ENTORNO (TÍRIG, CASTELLÓN)

Cabrelles, M., Lerma, J.L.

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE CROWDSOURCING EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA VOLUNTARIA

Gómez-Barrón, J.P., Manso-Callejo, M.A., Alcarria, R.

LA REPRESENTACIÓN GRÁFICA GEORREFERENCIADA ALTERNATIVA EN LA COORDINACIÓN CATASTRO-REGISTRO EN ESPAÑA. ESTUDIO DE LA IMPLANTACIÓN DE LA NORMA ISO-19152 (LADM) A NIVEL INTERNACIONAL

Velilla-Torres, J.M., Mora-Navarro, G., Femenia-Ribera, C., Martínez-Llarío, J.C.

ANÁLISIS DE LA COLABORACIÓN CIENTÍFICA EN LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

Fombuena, A.

APLICACIÓN DE ÍNDICES DE FORMA EN LA DETERMINACIÓN DE POLÍGONOS SLIVERS DERIVADOS DE LAS DIMENSIONES LINEALES DE UNA FIGURA Y SU ÁREA

Sánchez, M., Gallego, A.

Geodesia y Geofísica

ANÁLISIS DE SISMICIDAD ASOCIADA AL LLENADO DE EMBALSES. CASO DEL CENTRO DE PRODUCCIÓN DE PIRRÍS (COSTA RICA)

Ruiz-Barajas, S., Alvarado, G.E., Benito, B., Climent, A.

TRANSFERENCIA DE ESFUERZOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA SERIE SÍSMICA DE AHAR-VARZAGHAN (NOROESTE DE IRÁN) DE 2012.

Yazdí, P., Gaspar, J.M., Santoyo, M.A

ESTIMACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN CASTILLA LA MANCHA PARA LA ELABORACIÓN DEL PLAN ESPECIAL DE EMERGENCIAS

Romero-Jarén, R., Quirós, L., Sorondo, F., Benito, B.

INFLUENCIA DEL ESPECTRO SÍSMICO EN LOS EFECTOS DE LOS TERREMOTOS EN LAS EDIFICACIONES

Navas, L., Cervera, J., Benito, B.

EPOS (EUROPEAN PLATE OBSERVATION SYSTEM)

Fernández, J., Gallart, J., Carbonell, R., Díaz, J., Villaseñor, S., Azor, A., González-Matesanz, F.J., Geyer, A., Curto, J.J., Mattesini, M., Rodríguez-Fernández, L.R., Fernández-Turiel, J.L.

Observación de la Tierra, Cartografía y Aplicaciones Medioambientales

APLICACIONES DE LOS ÍNDICES DE FRAGMENTACIÓN DE LOS USOS DEL SUELO PARA CARACTERIZAR LA EXPANSIÓN URBANA

Sapena, M., Ruiz, L.A.

DISPERSIÓN URBANA Y SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL EN LA COMUNIDAD VALENCIANA

Miñana-Fayos, S., Gielen, E., Riutort-Mayol, G.

VARIABILIDAD DE LA LÍNEA DE COSTA A PARTIR DE IMÁGENES DE SATÉLITE Y SU RELACIÓN CON LA TEXTURA DEL SEDIMENTO

Cabezas-Rabadán, C., Almonacid-Caballer, J., Pardo-Pascual, J.E., Soriano-González, J.

HERRAMIENTA DISEÑADA EN MATLAB PARA LA ORDENACIÓN DE REDES DE DRENAJE POR LAS JERARQUÍAS DE HORTON Y HACK

Pastor-Martín, C., Antón, L., Fernández-González, C.

CIGeo

**Geocomputación,
Modelado y Patrimonio**

DIFUSIÓN DEL ARTE RUPESTRE A TRAVÉS DE APLICACIONES MÓVILES DE REALIDAD AUMENTADA: UN ENFOQUE PRÁCTICO

ROCK ART DISSEMINATION THROUGH AUGMENTED REALITY MOBILE APPLICATIONS: A PRACTICAL APPROACH

Silvia Blanco-Pons*, José Luis Lerma

Grupo de investigación en Fotogrametría y Láser Escáner (GIFLE), Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, 46022 Valencia, España. silblapo@doctor.upv.es; jllerma@cgf.upv.es

Abstract:

Rock art of the Mediterranean Basin of the Iberian Peninsula was declared World Heritage Site by UNESCO, it has an outstanding cultural value hence its dissemination is essential. Over the years, rock art paintings have been deteriorated and even some have disappeared. Consequently, it is quite difficult to recognise them *in situ* without experts. At this point, non-invasive and novel techniques can offer great potential, on the one hand, avoiding direct contact with the surface promoting its conservation, and on the other hand, through dissemination and analysis of these elements. One of the most promising techniques is Augmented Reality (AR). By means of AR applications, the visitor can see any kind of virtual content related to cultural heritage, through its mobile or tablet screen. Thus, any virtual content that is considered of interest can be added, offering in this way additional information that complements the real element.

In this study, two approaches are presented for the rock art dissemination of the Cova dels Cavalls. The first is based on a marker recognition, which launches the application that displays an image of the motif and a descriptive text about it. In the second proposal, the camera device recognises the real image of the painting and the virtual information is overlapped. The study aims at evaluating the use of these AR techniques applied to rock art dissemination and shows the methodology for its development.

Key words: Augmented Reality, Rock Art, Dissemination, Unity, ARToolkit, Mobile Applications

Resumen:

El Arte rupestre del arco mediterráneo de la Península Ibérica declarado Patrimonio Mundial por la UNESCO, tiene un gran valor cultural por lo que su difusión resulta esencial. Con el paso de los años, las pinturas se han ido deteriorando e incluso algunas han desaparecido. Es por ello que resulta muy difícil reconocerlas en los yacimientos sin la ayuda de expertos. Es en este punto en el que las técnicas no invasivas y más novedosas pueden ofrecer un gran potencial, no solo a la hora de evitar el contacto directo con la superficie fomentando así su conservación, sino también por la difusión y análisis de estos elementos. Una de las técnicas más prometedoras en este sentido es la Realidad Aumentada (RA) ya que, gracias a ella, el visitante puede ver cualquier tipo de contenido virtual relacionado con el patrimonio, a través de la pantalla de su móvil o tableta. Así, todo contenido virtual que se considere de interés puede ser añadido, ofreciendo de esta manera información adicional que complementa al elemento real.

En este estudio se presentan dos propuestas de RA planteadas para la difusión de las pinturas rupestres de la Cova dels Cavalls. La primera está basada en el reconocimiento de un marcador, el cual activa la aplicación mostrando al visitante la imagen 2D de uno de los motivos y un texto descriptivo del mismo. En la segunda propuesta, la cámara del dispositivo reconoce la imagen real de la pintura rupestre y superpone la información virtual. Con este estudio se pretende valorar el uso de estas técnicas de RA aplicadas a la difusión de arte rupestre y mostrar la metodología para su desarrollo.

Palabras clave: Realidad Aumentada, Arte Rupestre, Difusión, Unity, ARToolkit, Aplicaciones móviles

1. Introducción

Las pinturas rupestres del arte Levantino, clasificadas como Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO (Unesco 1998), se localizan en abrigos de difícil acceso y expuestas a agentes externos que comprometen su conservación. Con el paso de los años, las pinturas se han ido deteriorando y en la actualidad resulta muy difícil identificarlas sin la ayuda de expertos. Según The Venice Charter (1964), es nuestro deber conservar y

difundir el patrimonio cultural, así como salvaguardarlo para futuras generaciones. La fragilidad de las manifestaciones de arte rupestre y la difícil tarea de reconocerlas *in situ*, hace necesario el estudio y desarrollo de nuevos métodos de divulgación (Blanco-Pons *et al.* 2016). Además, debido al gran deterioro que normalmente presentan, su estudio debe abordarse a través de técnicas no invasivas que eviten el contacto directo con la superficie (Domingo *et al.* 2015).

* Corresponding Author: Silvia Blanco-Pons, silblapo@doctor.upv.es

Actualmente, una de las técnicas que mejor se adapta a este contexto es la Realidad Aumentada (RA), puesto que permite la visualización de cualquier tipo de contenido virtual a través de dispositivos portables, sin ningún contacto o alteración del lugar. Esta tecnología permite la superposición de información virtual a cualquier objeto real permitiendo ampliar de esta manera la información sobre el mismo en tiempo real (González *et al.* 2011). Por medio de esta tecnología es posible mejorar la realidad mediante la combinación de objetos reales y virtuales (Telefonica 2011). Con una aplicación de RA, el usuario puede identificar y visualizar las pinturas rupestres a través de su móvil o tableta, in situ, sin alterar en ningún momento las pinturas rupestres visitadas.

Aunque esta tecnología nació a mediados de los años 90, ha sido en los últimos años cuando se ha vuelto portátil y fácil de usar gracias a los teléfonos inteligentes. Los actuales teléfonos y tabletas son dispositivos de fácil manejo que cuentan con las herramientas necesarias para desarrollar esta tecnología: una cámara de alta resolución, un buen procesador, sensores y conexión a internet. Es por ello que el número de investigaciones y aplicaciones móviles relacionadas con esta tecnología, se ha visto incrementada en los últimos años (Bernhardt *et al.* 2017; Carmigniani *et al.* 2011).

La RA fue definida en 1997 por Azuma (Azuma 1997) como un sistema que combina el mundo real y virtual, interactivo en tiempo real, donde la información virtual está perfectamente alineada con el mundo real. Azuma ya definió numerosos campos en los que puede ser de interés su aplicación y entre los que destacan la medicina, la fabricación y la reparación, la robótica y el entretenimiento. Algunos ejemplos de aplicación en medicina se pueden encontrar en (Bernhardt *et al.* 2017; Fischer *et al.* 2007). Decir que aunque esta tecnología se aplica principalmente en el ámbito de los videojuegos (Kim *et al.* 2014; Kwik and Bahana 2015) también se emplea para la elaboración de material didáctico interactivo (Jamali *et al.* 2015).

Asimismo, en los últimos años se están introduciendo aplicaciones relacionadas con la divulgación del patrimonio cultural. Una gran parte de ellas se centra en el uso de aplicaciones de RA dentro de museos, para mejorar la experiencia del visitante (Flores Gutierrez *et al.* 2011; Rubino *et al.* 2015). Además, la RA también ayuda a mostrar los diferentes estados del proceso de restauración de forma comprensiva para el visitante (Haladová *et al.* 2015). Fuera de museos, estas aplicaciones se utilizan para mostrar información histórica de una ciudad (Haugstvedt and Krogstie 2012) o para mostrar reconstrucciones de lugares arqueológicos desaparecidos (Pierdicca *et al.* 2015).

Este artículo tiene por objeto presentar varias propuestas de difusión de las pinturas rupestres de la Cova dels Cavalls (Tírig, Castellón) mediante aplicaciones de RA. Se pretende conocer el alcance y las limitaciones de esta técnica aplicada al reconocimiento y la difusión del arte rupestre. Para el desarrollo de las aplicaciones se ha utilizado Unity, potente software que nació para el desarrollo de videojuegos, junto a la librería ARToolkit, la cual incluye las funcionalidades básicas para el desarrollo de una aplicación de RA.

2. Realidad Aumentada

La RA es una potente herramienta de visualización que mejora la percepción e interacción con el mundo real. Los elementos principales de toda aplicación de RA son (Telefonica 2011):

- Visor de la realidad: Imagen que percibe el usuario en tiempo real. Esta imagen se obtiene a través de la cámara del dispositivo móvil y es un elemento fundamental para este tipo de aplicaciones.
- Métodos de registro y seguimiento. Son los encargados de calcular la posición relativa de la cámara con respecto a los objetos de la escena real (González *et al.* 2011). Para realizar este proceso es necesario hacer uso de algoritmos de visión por computador para lo que se requiere un buen procesador, ya que este cálculo se realiza en tiempo real y debe ser rápido. Los métodos de seguimiento se detallan a continuación.
- Contenido Virtual. Todo el contenido digital que será superpuesto a la vista real capturada por la cámara. Este contenido puede ser muy variado: textos, imágenes, modelos 3D, animaciones, etc. La importancia del contenido virtual radica en la posibilidad de mostrar al usuario información que enriquezca la visita in situ.

2.1. Métodos de seguimiento

Los métodos de seguimiento tratan de obtener la posición y la rotación de la cámara respecto al objeto del mundo real, para alinear el objeto virtual con el objeto real. El correcto registro de la escena es imprescindible en cualquier aplicación puesto que la información virtual debe posicionarse correctamente sobre la vista del elemento real. Para calcular la posición de la cámara se precisan un conjunto de referencias conocidas que pueden ser elementos de una imagen o marcadores cuya geometría se conoce previamente (González *et al.* 2011). Los métodos de seguimiento se dividen en:

2.1.1. Seguimiento basado en sensores

Este método de seguimiento utiliza uno o varios sensores para detectar la posición de la cámara del dispositivo. Estos sensores pueden ser el giróscopo, la brújula, el sistema global de navegación por satélite (GNSS), el sistema de navegación inercial, etc. Con la combinación de varios tipos de sensores se puede lograr un posicionamiento preciso (Zhou *et al.* 2008).

2.1.2. Seguimiento basado en visión

Este método está basado en el reconocimiento de la imagen. Utiliza la información obtenida de las imágenes para calcular la posición y la orientación de la cámara. En los últimos años ha aumentado el uso de este tipo de métodos debido a la capacidad computacional de los actuales dispositivos móviles.

En función de los elementos a reconocer, se pueden diferenciar dos metodologías de seguimiento basado en imagen:

2.1.2.1. Seguimiento basado en marcadores

Este método utiliza patrones predefinidos fácilmente reconocibles por su alto contraste (normalmente patrones en blanco y negro), que se colocan en la escena a aumentar. El inconveniente de este método es que siempre es requerido un marcador y hay casos donde no pueden ser colocados. En contraposición, es un método muy rápido.

ARToolkit utiliza marcadores cuadrados en blanco y negro con diferentes patrones en el interior del cuadrado blanco (Fig. 1). Para la detección del marcador, ARToolkit identifica los vértices y aristas que definen el marcador mediante un algoritmo de detección de bordes. Posteriormente, en la fase de normalización, se extrae el contenido de la marca (patrón) y se compara con los patrones de las marcas conocidas (González *et al.* 2011).



Figura 1: Marcadores predefinidos de ARToolkit.

2.1.2.2. Seguimiento sin marcadores (Reconocimiento de imágenes reales)

Para el cálculo de la posición y la orientación de la cámara, este método necesita registrar un número suficiente de marcas en la escena a reconocer. Para ello, la escena a reconocer debe tener suficientes detalles fácilmente identificables, diferentes texturas, colores y altos contrastes.

Estos métodos requieren procesamientos más complejos y por tanto de más tiempo, lo que ralentiza el proceso de aumento de la información. Como principal ventaja, son métodos no intrusivos y más intuitivos ya que no requieren de ningún tipo de patrón adicional y son capaces de reconocer una escena real si identifican un número suficiente de puntos.

2.1.3. Métodos de seguimiento híbridos

En muchos casos, el seguimiento sin marcadores no es suficientemente preciso debido a sus limitaciones. Para aumentar la precisión y la velocidad de este método es posible combinarlo con otros. Por ejemplo, la localización mediante navegador GNSS y la brújula, por si solos no tienen suficiente precisión para la correcta posición de la cámara, pero junto con los métodos basados en visión, se consigue un sistema de seguimiento más preciso.

3. Diseño del caso de estudio

Las pinturas de la Cova dels Cavalls están localizadas en el barranco de la Valltorta (Fig. 2), en la provincia de Castellón y fueron descubiertas en 1917 por Albert Roda i Segarra (Martínez and Villaverde 2002). Fue un descubrimiento de suma importancia debido a la cantidad de manifestaciones rupestres encontradas, pero la falta de protección durante años supuso la

destrucción y el deterioro de numerosas pinturas (Martínez and Villaverde 2002).

El trabajo se centra en uno de los motivos encontrados en la Cova dels Cavalls, nombrado como Motivo 7 (Fig. 3), el cual representa un arquero en disposición de disparo. Dentro del abrigo, el motivo 7 está localizado en la cavidad I (Fig. 4).



Figura 2: La Cova dels Cavalls, barranco de la Valltorta.



a) b)

Figura 3: Detalle del Motivo 7: a) Imagen realizada; b) Calco del motivo superpuesto.

Dos han sido las propuestas de RA planteadas para la difusión de las pinturas rupestres de la Cova dels Cavalls a través de dispositivos móviles. Ambas tienen un mismo objetivo, conocer el alcance y las limitaciones de esta técnica y mostrar el desarrollo de las aplicaciones. La primera propuesta muestra el motivo de estudio (Fig. 3) con un texto descriptivo cuando la cámara del dispositivo reconoce un marcador. En la segunda propuesta, la cámara del dispositivo reconoce la imagen real de la pintura rupestre y superpone la información virtual.

Con estas aplicaciones el usuario, a través de la cámara de su dispositivo móvil recibe información real e información virtual. En este caso, la información virtual es una imagen 2D con el calco del motivo (Fig. 3b) y un texto descriptivo del mismo. El texto añadido: "Pinturas rupestres en la Cova del Cavalls. Motivo 7. Arquero en disposición de disparo. El cuerpo se inclina decididamente. El brazo derecho, hacia atrás y doblado, por la tensión de la cuerda, el izquierdo sujeta, extendido, el arco, hacia abajo" ha sido extraído del monográfico La Cova dels Cavalls en el Barranc de la Valltorta (Martínez and Villaverde 2002).

Para el desarrollo de ambas propuestas se ha utilizado el software Unity (Unity 2017) y la librería ARToolkit .

Unity es un software multiplataforma creado para el desarrollo de videojuegos, que incorpora una interfaz

gráfica para diseñar el videojuego en 2D o 3D. Por su parte, la funcionalidad de los elementos del videojuego se desarrolla mediante scripts que ejecutan las acciones. El desarrollo de la aplicación de RA es similar a un videojuego, donde los elementos virtuales se diseñan en la interfaz gráfica del programa, y la funcionalidad de estos se añade mediante scripts. Las librerías de RA incorporan los scripts con las funcionalidades necesarias para reconocer una escena y posicionar el contenido virtual correctamente.

Actualmente hay disponibles multitud de librerías de RA para diferentes plataformas, como se estudia en (Blanco-Pons *et al.* 2016). En este trabajo se ha utilizado ARToolkit, una de las librerías de RA más populares. Su principal ventaja es que es de código abierto, por lo que se puede acceder al código fuente y modificarlo sin restricciones. Además, incluye los métodos de seguimiento basados en visión y es compatible con Unity.



Figura 4: Vista de la Cova dels Cavalls y localización del Motivo 7 de estudio.

4. Aplicaciones

La parte más compleja de una aplicación de RA es estimar correctamente la posición de la cámara relativa al objeto real. En las aplicaciones desarrolladas se han utilizados los métodos de seguimiento basados en imágenes explicados en el Apartado 2.1.2.

El sistema de seguimiento necesita obtener la trayectoria para calcular la posición actual y el punto de vista de cada dispositivo en tiempo real. La posición y la orientación de la cámara se estiman con seis grados de libertad, tres parámetros de translación (x , y , z) y tres parámetros de orientación (yaw , $pitch$, $roll$).

La ventaja que ofrecen las librerías de RA es que traen implementados estos métodos, por lo que el proceso de desarrollo de una aplicación de RA se reduce considerablemente. A continuación, se detallan las dos aplicaciones desarrolladas.

4.1. Reconocimiento basado en marcadores

La primera aplicación de RA se activa por medio de un marcador. La aplicación reconoce el marcador (Fig. 5a) y muestra en la pantalla del móvil el calco del Motivo 7 y un texto descriptivo de este (Fig. 5b). En cuanto a los marcadores, se ha utilizado uno de los que ARToolkit proporciona aunque se podría diseñar uno propio.

Los marcadores deben estar impresos sobre una superficie plana, por lo que este tipo de aplicaciones están más enfocadas a su uso en libros, folletos o paneles de museos con el fin de añadir información interactiva. Además, la información virtual se puede almacenar en un servidor de internet por lo que se podría actualizar fácilmente.

Por otro lado, estas aplicaciones no son idóneas para ser usadas al aire libre, ya que no siempre es posible colocar un marcador. Por ejemplo, si se quiere aumentar una escena de arte rupestre en el propio abrigo donde están localizadas, la utilización de marcadores es inviable, ya que estos lugares no se pueden alterar. Para ello se ha desarrollado la segunda propuesta.

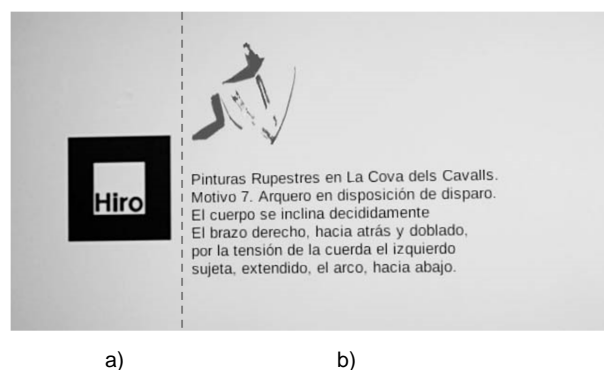


Figura 5: a) Marcador requerido para activar la aplicación. b) Elementos virtuales visualizados a través de la pantalla del teléfono al reconocer el marcador.

4.2. Reconocimiento basado en imágenes

La segunda propuesta se basa en el reconocimiento de una imagen real, de modo que la aplicación al reconocer la imagen impresa o in situ, muestra la información superpuesta al objeto real. En estas aplicaciones, la alineación correcta del objeto virtual con el objeto real es imprescindible para que la imagen virtual se superponga al objeto real.

Esta aplicación está enfocada a ayudar al visitante a reconocer, en un yacimiento, los motivos rupestres allí representados, ya que es difícil distinguir las pinturas sin la ayuda de un experto. Las pinturas suelen estar representadas en tonos rojizos, muy similares a los colores de la roca y muchas veces los motivos están bastante deteriorados.

La aplicación presentada se ha realizado sobre el Motivo 7, uno de los motivos mejor conservados del yacimiento. El funcionamiento de la aplicación es similar al explicado en el punto anterior, la cámara del dispositivo reconoce la escena (Fig. 6) y superpone el contenido virtual sobre la escena a través de la pantalla del dispositivo (Fig. 7). Como en el caso anterior, el contenido virtual es el propio calco del motivo visualizado y un texto explicativo, el cual ayuda al visitante a entender el propósito de la pintura.

La parte más complicada de este proceso y que requiere más tiempo, es el cálculo de la posición y la orientación de la cámara en tiempo real. La cámara del dispositivo escanea la imagen de entrada en busca de puntos y los compara con una base de datos de puntos conocidos. Para generar el fichero de puntos conocidos, ARToolkit proporciona el software genTexData.



Figura 6: Imagen del Motivo 7 tomada in situ.

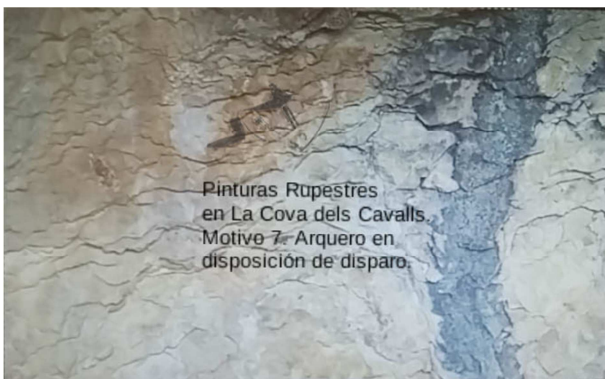


Figura 7: Captura de pantalla obtenida al reconocer la imagen del Motivo 7.

Este software crea dos ficheros para almacenar los puntos detectados en la imagen: el fichero .fset con los puntos detectados para el seguimiento continuo de la trayectoria y el fichero .fset3 con los puntos detectados para identificar la escena e inicializar el seguimiento. En escenas con muy pocos puntos detectados el seguimiento será muy difícil e incluso imposible.

La Figura 8 muestra los puntos detectados en la imagen del Motivo 7. El programa ha detectado un total de 194 puntos de seguimiento (marcados con cuadros rojos) y 648 puntos para la identificación de la escena (marcados con cruces verdes). El número de puntos detectados es suficiente para el correcto posicionamiento del contenido virtual en tiempo real. Además, los puntos detectados están repartidos por toda la escena. Esto hace que la escena pueda ser identificada aunque no se visualice al completo.

Las aplicaciones basadas en el reconocimiento de imágenes son muy versátiles puesto que se pueden aplicar a una imagen real y no requieren de ningún marcador adicional. Aun así, para mejorar el tiempo de reconocimiento y seguimiento de la imagen, estos métodos se pueden combinar con sensores de localización.

5. Discusión

Las aplicaciones de RA enfocadas a la divulgación de pinturas rupestres ofrecen múltiples posibilidades, desde mostrar información con un marcador predefinido hasta el reconocimiento de pinturas rupestres en el propio yacimiento. La ventaja de estas aplicaciones es la

posibilidad de añadir diferentes capas de información, haciendo la vista del usuario más atractiva y completa. Se pueden mostrar los calcos de los motivos representados e incluso una recreación del estado original del motivo. Además, los textos explicativos añaden información útil al visitante.

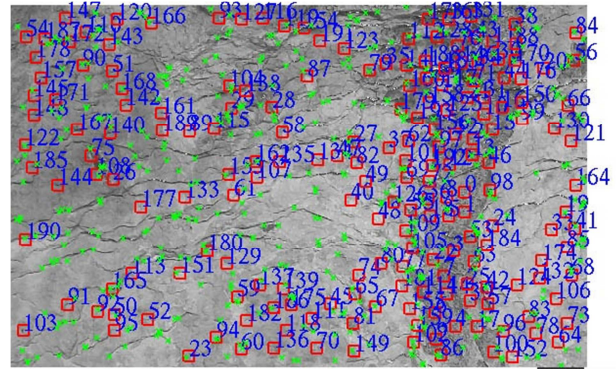


Figura 8. Puntos detectados para el seguimiento. Los cuadrados rojos son los puntos de seguimiento y las cruces verdes los puntos para la identificación de la escena.

Las aplicaciones basadas en el reconocimiento de marcadores no son idóneas para su uso en exterior puesto que requieren un marcador impreso sobre una superficie plana y visible en su totalidad. Sin embargo, el uso de marcadores es perfecto para libros interactivos o folletos y además, se puede utilizar en cartelería dentro de un museo. La ventaja de este método de reconocimiento es que es muy rápido.

Las aplicaciones basadas en el reconocimiento de imágenes son un recurso perfecto para su uso en el propio yacimiento, pero tienen algunos inconvenientes. En primer lugar, para mejorar la posición del contenido virtual se debe calibrar la cámara del dispositivo mediante la aplicación que proporciona la librería ARToolkit.

En segundo lugar, el número de puntos detectados en la escena es crucial. La librería Vuforia fue testeada para este propósito, y no detectó el número mínimo de puntos para el registro y seguimiento de la escena. Las escenas coloreadas, con grandes contrastes y muchos detalles son perfectas, pero esto no ocurre en las escenas de pinturas rupestres prehistóricas donde los colores son muy similares, y podría ocurrir que no se detectaran puntos suficientes, como sucede con la librería Vuforia. Hasta el momento, ARToolkit ha detectado gran cantidad de puntos en todas las escenas testeadas.

Debido a la gran cantidad de puntos que la aplicación tiene que analizar en el proceso de registro y seguimiento en tiempo real, el contenido virtual tarda varios segundos en ser visualizado y esto puede afectar a la experiencia de usuario. Este proceso requiere gran carga computacional por lo que es muy difícil que sea un proceso inmediato. Hace unos años era imposible realizar este proceso con un móvil, pero gracias al rápido avance del hardware de los actuales teléfonos inteligentes, ahora esto es posible. Probablemente, en unos años, el hardware seguirá mejorando y la capacidad computacional de los teléfonos permitirá realizar estos procesos mucho más rápido.

Por último, diferentes condiciones de iluminación pueden afectar al reconocimiento de la escena. Si en una determinada hora del día, el sol incide directamente sobre la pintura, difícilmente podrá ser detectada por la aplicación. Habrá que tener en cuenta esta variable cuando se realicen aplicaciones de este tipo en exterior.

6. Conclusiones

En este estudio se ha realizado un repaso de las técnicas de visualización de RA enfocadas a la divulgación de pinturas rupestres. Actualmente, gracias a las librerías de RA, el proceso de desarrollo de una aplicación de este tipo se reduce considerablemente, puesto que los algoritmos de seguimiento ya están implementados. Además, el uso de ARToolkit, librería de código abierto, permite modificar el código fuente, lo cual hace a esta librería muy adaptable a cualquier aplicación.

Por otro lado, las aplicaciones de esta técnica son infinitas y en el campo de la divulgación del arte rupestre

son muy útiles, puesto que el reconocimiento de los motivos sin ayuda en muchas ocasiones es imposible. En futuras investigaciones se pretende desarrollar una aplicación de RA que muestre varios motivos rupestres para evaluar la reacción del visitante ante el uso de este tipo de tecnologías.

Otra forma de divulgar las pinturas rupestres sería mediante aplicaciones de Realidad Virtual (RV). Esta tecnología es muy parecida a la RA con la diferencia de que en la RV todo el entorno es digital. Se pueden realizar visitas virtuales donde el usuario podría visitar las pinturas rupestres desde cualquier sitio. En futuras investigaciones se pretende realizar una visita virtual a la Cova del Cavalls mediante una aplicación de RV.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del Ministerio de Economía y Competitividad al proyecto HAR2014-59873-R.

References

- AZUMA, R., 1997. A survey of augmented reality. *Presence Teleoperators Virtual Environ.* 6, pp. 355–385. DOI:10.1.1.30.4999.
- BERNHARDT, S., NICOLAU, S.A., SOLER, L. and DOIGNON, C., 2017. The status of augmented reality in laparoscopic surgery as of 2016. *Medical Image Analysis*, 37, pp. 66–90. DOI:10.1016/j.media.2017.01.007.
- BLANCO-PONS, S., CARRIÓN-RUIZ, B. and LERMA, J.L., 2016. Review of augmented reality and virtual reality techniques in rock art, in: *Proceedings of the 8th International Congress on Archaeology, Computer Graphics, Cultural Heritage and Innovation* "ARQUEOLÓGICA 2.0.", pp. 176–183. DOI:http://dx.doi.org/10.4995/arqueologica8.2016.3561.
- CARMIGNIANI, J., FURHT, B., ANISETTI, M., CERAVOLO, P., DAMIANI, E. and IVKOVIC, M., 2011. Augmented reality technologies, systems and applications. *Multimedia Tools and Applications*. 51, 341-377. doi:10.1007/s11042-010-0660-6.
- DOMINGO, I., CARRIÓN, B., BLANCO, S. and LERMA, J.L., 2015. Evaluating conventional and advanced visible image enhancement solutions to produce digital tracings at el Carche rock art shelter. *Digital imaging techniques for the study of prehistoric rock art*. 2, 79-88. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.daach.2015.01.001.
- FISCHER, J., EICHLER, M., BARTZ, D. and STRÄßER, W., 2007. A hybrid tracking method for surgical augmented reality. *Computers and Graphics (Pergamon)*, 31, pp. 39–52. DOI:10.1016/j.cag.2006.09.007.
- FLORES GUTIERREZ, M., RUFETE MARTÍNEZ, T., MACANÁS VIDA, J., MARTÍNEZ GARCÍA, J., LÓPEZ MARTÍNEZ, C.M. and RAMOS MARTÍNEZ, F., 2011. Visor de Realidad Aumentada en Museos (RAM) para Exposiciones Situadas en Entornos Cerrados. *Virtual Archaeology Review*. 2, pp. 87-91.
- FUNDACIÓN TELEFONICA, 2011. Realidad Aumentada : una nueva lente para ver el mundo, Fundacion Telefonica.
- GONZÁLEZ, C., VALLEJO, D., ALBUSAC, J., CASTRO, J., 2011. Realidad Aumentada. Un enfoque práctico con ARToolkit y Blender pp. 2–120.
- HALADOVÁ, Z.B., SZEMZÖ, R., KOVAČOVSKÝ, T. and ŽIŽKA, J., 2015. Utilizing Multispectral Scanning and Augmented Reality for Enhancement and Visualization of the Wooden Sculpture Restoration Process. *Procedia Computer Science*, 67, pp. 340–347. DOI:10.1016/j.procs.2015.09.278.
- HAUGSTVEDT, A.-C. and KROGSTIE, J., 2012. Mobile augmented reality for cultural heritage: A technology acceptance study. *2012 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, pp. 247–255. DOI:10.1109/ISMAR.2012.6402563.
- JAMALI, S.S., SHIRATUDDIN, M.F., WONG, K.W. and OSKAM, C.L., 2015. Utilising Mobile-Augmented Reality for Learning Human Anatomy. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 197, pp. 659–668. DOI:10.1016/j.sbspro.2015.07.054.
- KIM, S.L., SUK, H.J., KANG, J.H., JUNG, J.M., LAINE, T.H. and WESTLIN, J., 2014. Using Unity 3D to facilitate mobile augmented reality game development. *Internet of Things (WF-IoT), 2014 IEEE World Forum on*, pp. 21–26. DOI:10.1109/WF-IoT.2014.6803110.
- KWIK, F. and BAHANA, R., 2015. Using Augmented Reality to Enhance Aetherpet, a Prototype of a Social Game. *Procedia Computer Science*, 59, pp. 282–290. DOI:10.1016/j.procs.2015.07.566.

- MARTÍNEZ, R. and VILLAVARDE, V., 2002. La Cova dels Cavalls.
- PIERDICCA, R., FRONTONI, E., ZINGARETTI, P., MALINVERNI, E.S., COLOSI, F. and ORAZI, R., 2015. Making Visible the Invisible. Augmented Reality Visualization for 3D Reconstructions of Archaeological Sites. *Augmented and virtual reality: Second International Conference, AVR 2015*, 9254, pp. 25–37. DOI:10.1007/978-3-319-22888-4.
- RUBINO, I., BARBERIS, C., XHEMBULLA, J. and MALNATI, G., 2015. Integrating a Location-Based Mobile Game in the Museum Visit: Evaluating Visitors' Behaviour and Learning. *Journal on Computing and Cultural Heritage*. **8**, 15:1-15:18. doi:10.1145/2724723.
- THE VENICE CHARTER, 1964. The Venice Charter 1964. Int. Chart. Conserv. Restor. Monum. Sites.
- UNESCO, 1998. Arte rupestre del arco mediterráneo de la Península Ibérica. Disponible: <http://whc.unesco.org/es/list/874> [5/14, 2017].
- UNITY, 2017. Unity - Game Engine. Disponible: <https://unity3d.com/es> [5/14, 2017].
- ZHOU, F., DUH, H.B. and BILLINGHURST, M., 2008. Trends in Augmented Reality Tracking , Interaction and Display : A Review of Ten Years of ISMAR. *Mixed and Augmented Reality, 2008. ISMAR 2008. 7th IEEE/ACM International Symposium on* 193–202, DOI:10.1109/ISMAR.2008.4637362.

DIFERENTES PAISAJES Y ANÁLOGAS REPRESENTACIONES. INTERPRETACIÓN ARQUEOLÓGICA CON TECNOLOGÍAS DE INGENIERÍA INVERSA

**DIFFERENT LANDSCAPES AND ANALOGS REPRESENTATIONS. ARCHAEOLOGICAL INTERPRETATION WITH
INVERSE ENGINEERING TECHNOLOGIES**

Xosefina Otero^{a,*}, Mercedes Farjas^a, Manuel Santos^b, Jorge Angás^c

^a ETS de Ingenieros en Topografía, Cartografía y Geodesia, Universidad Politécnica de Madrid, Campus Sur- UPM Crta. de Valencia km 7, 28031 Madrid, España. artabria@gmail.com, m.farjas@upm.es

^b Lab2Pt Universidade do Minho, Braga, Portugal, manuel.santos@mundo-r.com

^c 3DScannerTechnologies, Avenida de Navarra 103, Zaragoza administrador@3dscanner.es

Abstract:

In this paper we present new methods of the documentation and registration of the petroglyphs of the exceptional archaeological site located on Khor Fakkan, emirate of Sharjah, on the east coast of the United Arab Emirates along the Gulf of Oman, and coordinates 24°59'06.06" N - 56°20'36.70" E. The engravings on the surface of the serpentine rock fragments, of the Semail ophiolite complex that was generated when the Saudi plate was introduced under the Iran-Zagros, in the Cretaceous, are made with the technique and striped characteristic of the Bronze Age and Iron Age. We conducted the study respecting its conservation without any intervention on them, using the latest available technologies and performing aerial, terrestrial and near object digital photogrammetry and applying at the same time the methodology of Landscape Archaeology.

Key words: Petroglyphs, Bronze Age, Iron Age, Aerial, terrestrial and near object digital photogrammetry, Landscape Archaeology.

Resumen:

En este artículo presentamos nuevos métodos de documentación y registro de los petroglifos de un sitio arqueológico excepcional localizado en Khor Fakkan, en el Emirato de Sharjah, en la costa este de los Emiratos Árabes Unidos, a lo largo del Golfo de Omán y cuyas coordenadas geográficas son 24°59'06.06" N - 56°20'36.70" E. Los grabados, en la superficie de fragmentos de roca serpentina del complejo ofiolítico Semail, que fue generado cuando la placa Saudí se introdujo bajo la Irán-Zagros, durante el Cretácico, se realizaron con técnicas y estilos propios de la Edad del Bronce y del Hierro. Llevamos a cabo su estudio respetando su perfecta conservación y sin ningún tipo de intervención sobre ellos, utilizando las últimas tecnologías disponibles y realizando fotogrametría digital aérea, terrestre y de objeto cercano, y aplicando, a la vez, la metodología de la arqueología del paisaje.

Palabras clave: Petroglifos, Edad de Bronce, Edad de Hierro, Fotogrametría digital aérea, terrestre y de objeto cercano, Arqueología del Paisaje.

1. Introducción

Khatm al Melaha es un emplazamiento arqueológico ubicado en Kalba (Khor Fakkan), Emirato de Sharjah, en la costa este de los Emiratos Árabes Unidos (Fig. 1). Se trata de una pequeña y redondeada colina que apenas se eleva 27 metros sobre el nivel del mar, pero su posición en el territorio y su ubicación solitaria en la desembocadura de un wadi, la convierte en un espacio excepcional, cuya característica más destacable es una potente visibilidad. Cuando se visita, y posteriormente se va trabajando con este yacimiento, se comprueba que durante miles de años el sitio poseyó una indudable finalidad simbólica.

La línea de costa, hoy alejada algo más de un kilómetro, se encontraba a los pies de la colina en el período en

que fueron realizados los grabados que constituyen la base de nuestro trabajo de investigación. Los concheros en la base de la misma, cuya datación más antigua se retrotrae al V milenio a.C., y su reutilización datada ya en periodos consecutivos pertenecientes a la Edad del Bronce y a la Edad del Hierro, atestiguan, aparte de otras evidencias, el uso continuado que se confirió a este lugar durante todo un amplísimo período temporal.

Los planteamientos metodológicos que nos propusimos para abordar el estudio de los petroglifos son, por una parte, a nivel teórico, el empleo de los métodos de trabajo de la Arqueología del Paisaje y por otra, y a nivel técnico, la utilización de las nuevas tecnologías de fotogrametría digital y escaneado láser como recurso óptimo para el registro, documentación, procesamiento y

* Corresponding Author: Xosefina Otero, artabria@gmail.com

posterior divulgación de los resultados (Farjas *et al.* 2010).

La gran mayoría de los petroglifos localizados en Khatm al Melaha, se encuentran en la ladera orientada al este. Por tanto, en los diferentes períodos en que fueron realizados los grabados, estos serían también visibles, o al menos localizables, desde el mar, algo que se repite en petroglifos ubicados en zonas costeras de Europa.

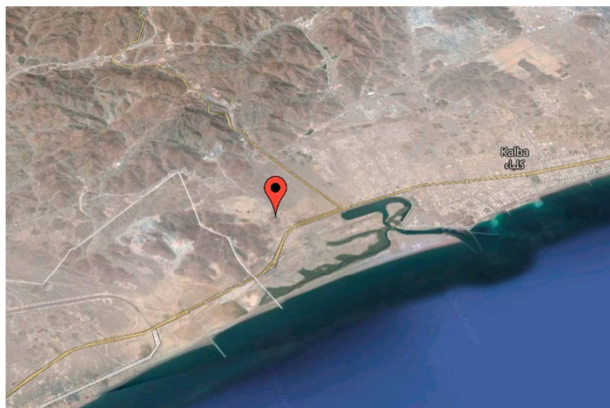


Figura 1: Emplazamiento de Khatm al Melaha (Google).

En la última campaña, en noviembre de 2016, realizamos una prospección visual de la siguiente ladera orientada al este, pues la colina tiene dos tramos, uno primero coronado por un enterramiento, que ha sido datado en la Edad del Bronce Temprana, a finales del IV milenio o principios del III a.C., y que forma parte de un conjunto de tumbas del mismo período que jalonan toda la vertiente de una pequeña cordillera al sur de la colina que limita con el Sultanato de Omán.

En esta zona de la península arábiga, son numerosos este tipo de enterramientos que suelen ubicarse en las cimas de las montañas a lo largo de crestas prominentes y muy visibles (Dood and Dueñas 2014).

Los resultados de esta prospección fueron, en principio, estériles, puesto que no encontramos grabados en este segundo tramo de la colina, pero sería recomendable realizar una nueva prospección en detalle, pues en la cima se localizan un mayor número de enterramientos, y posee una perfecta visibilidad de 360° sobre todo el territorio.

Sabemos que los petroglifos servían como "mensajes" entre grupos y personas que no estaban presentes simultáneamente, así pues, los destinatarios de dichos mensajes deberían ser capaces de localizar los petroglifos (Bradley *et al.* 1994) y de ese modo descifrar o interpretar el significado de dichos códigos.

Si no había escritura en esos períodos culturales, es lógico pensar que las representaciones, tanto pictóricas como de grabados en soporte pétreo, deberían cumplir una función narrativa entendible por los individuos de esas sociedades. Es muy difícil interpretarlos porque nuestro pensamiento simbólico se ha transformado radicalmente, pero parece obvio que debían ser algo más que una expresión puramente artística.

2. El arte rupestre de Khatm al Melaha

Los grabados de Khatm al Melaha fueron trazados en la superficie de fragmentos de roca serpentina, del complejo ofiolítico Semail, que se generó cuando la placa Saudí se introdujo bajo el sistema Irán-Zagros, durante el Cretácico.

Hay localizados, en la colina, más de un centenar de paneles. Estos se encuentran esparcidos en la ladera este, a partir de unos metros de la base y hasta la cima de la misma (Fig. 2).



Figura 2: Vista de la ladera Este, donde se ubican los petroglifos.

En la investigación actual ya no hay ninguna duda que "la localización de los petroglifos está determinada por patrones regulares de emplazamiento y relación con el entorno vinculados al uso y aprovechamiento de esos espacios" (Criado *et al.* 2013) y a pesar de las enormes diferencias medioambientales entre la localización de éstos y los que, simultáneamente, se estaban produciendo en otros puntos del planeta, incluso a miles de kilómetros, las características son peculiarmente comunes.

Esto nos ha llevado a formular una de las cuestiones fundamentales de la presente investigación: ¿por qué en espacios tan alejados y ambientalmente diferentes, se estaban produciendo manifestaciones representativas de la relación y utilización del paisaje tan similares? Las superficies y alturas escogidas para realizar las representaciones de Khatm el Melaha, las técnicas empleadas, los motivos representados, nos trasladan, inevitablemente, a otras representaciones de Europa y África del mismo período (Fig. 3).

En este marco científico, nuestro trabajo se centra en la utilización de técnicas de medición avanzadas que permitan obtener una reconstrucción virtual del emplazamiento y encajarlo en su paisaje original (Santos 1998), reproduciendo las condiciones ambientales en las que vivían los autores de los petroglifos y sus comunidades; así como facilitar el estudio de los detalles de los mismos, haciendo posible analizar e interpretar cómo fueron realizados, qué motivos eran los más utilizados, su potencia simbólica y ritual, y llegar a poder analizar estudios comparados con petroglifos llevados a cabo por culturas coetáneas en territorios muy alejados de nuestra zona de estudio.

De entre los más de cien paneles, seleccionamos 22 para su reproducción fotogramétrica por el interés

iconográfico que presentaban con respecto a los propósitos de nuestro proyecto.



Figura 3: Panel con representación de un cérvido y técnica de abrasión.

En los motivos de los grabados del Bronce, con una datación aproximada del 2000 a.C., predominan cuadrúpedos característicos de la zona: oryx, ibex, y otros ungulados, así como otros motivos diferenciados, como el que pensamos podría ser una embarcación, o una representación humana con círculos concéntricos centrales.

Encontramos paneles de manadas (Fig. 4), hembras con crías en actitud relajada, sin gestos de tensión de caza, y con evidentes esfuerzos, por parte del autor o autores de los mismos, por intentar representar diferentes perspectivas, y otros paneles, de menor tamaño, con individuos sueltos, tanto machos como hembras.



Figura 4: Panel con una manada de cérvidos y técnica de piqueteado.

Otro capítulo muy interesante, también con técnica de piqueteado, estaría compuesto por las representaciones esquemáticas de formas sinuosas, círculos concéntricos asociados a una representación humana y diseños de "rectángulos con esquinas redondeadas y segmentados en el interior por diámetros horizontales y verticales" (Santos 2007) que deseamos estudiar en la próxima campaña pues encontramos marcados paralelismos con representaciones similares al Esquemático Atlántico del noroeste peninsular.

En cuanto a las representaciones de la Edad del Hierro, tal como señala Santos (2007) para el Arte Rupestre Atlántico de la misma época, observamos que los

paneles parecen representar la preponderancia de la sociedad humana sobre la naturaleza, expresada a través del dominio de los humanos sobre los animales.

Vemos paneles con escenas en las que dicho dominio queda patente a través de determinados rituales que conocemos de prácticas recogidas en estudios sobre el mundo mágico-religioso de culturas europeas antiguas (Santos 2004). La técnica empleada para la realización de estas figuras es por abrasión, muy probablemente realizada con un objeto pétreo (Fig. 5).



Figura 5: Paneles con escenas simbólico-mágicas y técnica de abrasión.

En relación a esto, podemos mencionar otras zonas próximas al yacimiento de Khatm al Melaha, con abundante arte rupestre coetáneo, como el sitio arqueológico de Wadi Halo (Fig. 6), en el mismo Emirato de Sharjah, en donde nos volvemos a encontrar escenas muy parecidas, y con varias representaciones de jinetes, que nos están arrojando una cronología que no podría ser anterior al siglo IX a.C., cuando se produjo la domesticación de los caballos.



Figura 6: Paneles con escenas de jinetes en Wadi Halo.

A lo largo de la Prehistoria Reciente y la Protohistoria, las comunidades humanas, en áreas geográficas tan distantes, tales como la Península Arábiga, que es la que nos ocupa en la actualidad, y Europa Occidental, se expresaban, través del arte rupestre, con iconografías muy semejantes. Dichas semejanzas podrían ser explicadas por los contactos a larga distancia entre

ambas zonas, especialmente intensos a partir de la innovación de la metalurgia, industria que demanda redes de intercambio para conseguir materias primas que no se encuentran distribuidas de forma regular (Kristiansen and Larsson 2005).

Hay estudios precedentes, en este sentido, que se han centrado fundamentalmente en Europa y su entorno cercano, sin embargo, nosotros consideramos que sería interesante buscar evidencias de que dichas redes se extendían también hasta áreas geográficas mucho más alejadas. No obviamos, en ningún momento, que hay otras teorías sociológicas y antropológicas que dicen que “sociedades con un nivel de evolución semejante pudieron haber seguido estrategias semejantes para expresar su ideología”, lo que favorecería, en su opinión, los parecidos iconográficos, aunque, en la nuestra, no los estilísticos.

Este artículo solo pretende ser un breve avance de los trabajos que queremos desarrollar en esta zona, tan desconocida para nuestro ámbito arqueológico. Los resultados de dichos trabajos creemos que pueden ser sumamente interesantes, sobre todo si tenemos en cuenta su riqueza y su carácter inédito.

3. Fotogrametría digital: aérea, terrestre y de objeto cercano

Para realizar nuestro trabajo de investigación sobre los petroglifos de Khatm al Melaha, con técnicas no invasivas y que nos proporcionase la mayor cantidad y calidad de información posible, nos decantamos por el empleo de las técnicas fotogramétricas, que nos permiten realizar todos los procesos con gran economía, tanto en tiempo como en recursos (Rodríguez, 2014).

A partir de la captura de imágenes con una cámara digital, y el posterior tratamiento de las mismas con un software específico (Cabezas and Cisneros 2012), generamos una nube de puntos de los objetos, en nuestro caso cada uno de los paneles, que posteriormente nos permite realizar una malla densa y con la que obtenemos modelos 3D de cada uno de ellos y medidas de los mismos con una precisión adecuada para el estudio y para también poder actuar sobre las geometrías (Aparicio 2013).

En la campaña de noviembre de 2015, en Khtam al Melaha, además de realizar las tomas con una cámara digital Nikon D3200, con una resolución de 24 megapíxeles, que proporciona una calidad de imagen más que suficiente para realizar la fotogrametría de los paneles, se pudo emplear una nueva herramienta que nos permite la medición y modelado 3D en tiempo real mediante fotogrametría estereoscópica y escaneado por triangulación óptica.

Se trata de una tableta, denominada Tablet EyesMap, y que consiste en un dispositivo fabricado por la empresa española de tecnología **e-Capture**, ubicada en Mérida, Badajoz, que fue creada para llevar a cabo el desarrollo de este producto (Fig. 7).

El equipo EyesMap cuenta con un procesador Intel Core i7, de 16 gigas de RAM, y funciona sobre el sistema operativo Windows 8, muy fácil de usar una vez nos familiarizamos con su manejo. En la parte trasera de la tablet se ubican dos cámaras Sony de 13 megapíxeles,

y un sensor de profundidad, así como sistemas GNSS e inerciales, que llevan a cabo la georreferenciación en tiempo real, otro avance considerable en economización de tiempo.

En cuanto a las capacidades de escaneo 3D de la tablet, se pueden digitalizar desde pequeños objetos a espacios interiores o exteriores, e incluso grandes construcciones. En la campaña de 2015, de Khatm al Melaha, fue utilizada en rangos de distancia medios y cortos.

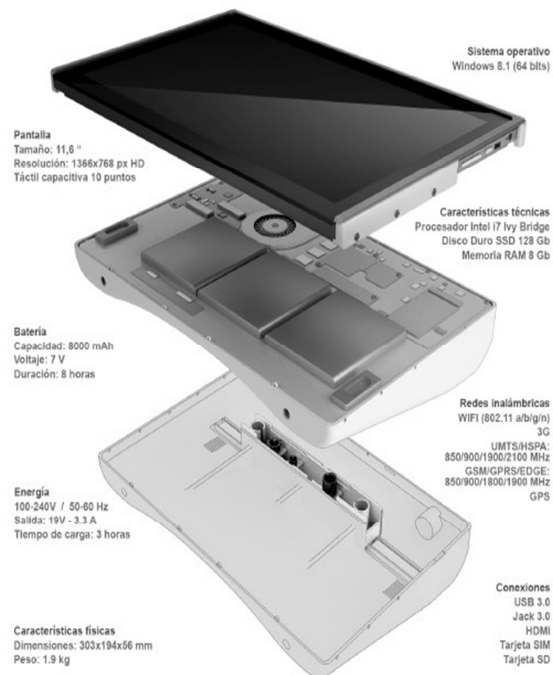


Figura 7: Especificaciones técnicas de la Tablet EyesMap (eCapture, 2016).

Cuando se inicia la aplicación EyesMap en la Tablet, se muestra el menú principal. Desde este menú se pueden seleccionar los distintos módulos, ocho en total:

- **Los 3 primeros módulos** están dedicados a la fotogrametría punto a punto, cuyo fin es la medición de coordenadas, distancias y superficies.
- **Fotomodelado 3D:** es el módulo a partir del cual se realizan modelos 3D con técnicas fotogramétricas utilizando las estereó cámaras.
- **Sensor de profundidad 3D:** módulo de generación de una nube de puntos 3D utilizando el sensor de profundidad. Está indicado principalmente para zonas cercanas (máximo 4 metros) e interiores, y es especialmente útil en superficies homogéneas y sin texturas.
- **Ortofotografía:** generación de ortofotografías sobre las que se pueden realizar imágenes del objeto con una proyección ortogonal. Es muy útil para aplicaciones arquitectónicas y arqueológicas.
- **GPS:** este módulo permite el posicionamiento en coordenadas absolutas de la Tablet en

tiempo real. También se pudo utilizar el módulo de post-proceso con el fin de mejorar las precisiones.

- **Menú:** este módulo permite gestionar proyectos, actualizar la aplicación, calibrar y orientar las cámaras

Para realizar el escalado de los modelos, usamos dianas estereoscópicas. En este proyecto se utiliza la de mayor tamaño, que tiene una longitud de 59 cm. (Fig. 8), y que es adecuada para escalar objetos medianos y grandes. Para objetos pequeños puede utilizarse la diana de 15 cm. Aunque no es necesario que aparezca la diana estereoscópica en todas las fotografías, es recomendable que se encuentre en el mayor número de imágenes para que el escalado sea más preciso. Este podría realizarse también manualmente.



Figura 8: Diana estereoscópica utilizada.

Las dianas individuales pueden ser simétricas o asimétricas, y ambas se combinan con la finalidad de realizar la orientación automática en el módulo de fotogrametría, para realizar la orientación de las estereo cámaras en el módulo "Orientación" y para realizar medidas de precisión en el módulo de fotogrametría punto a punto.

Los modelos obtenidos pueden ser georreferenciados a través del sistema GNSS en tiempo real con un error de 0,60 m. Si deseamos mayor precisión, se pueden recoger datos durante 10 minutos para después post-procesarlos, obteniéndose un error de 0,10 cm.

El sistema inercial integrado está compuesto por un giróscopo, un acelerómetro y un magnetómetro. Todo este sistema aporta información de velocidad, de la orientación de la tablet y de las fuerzas gravitacionales en tiempo real.

La tecnología fotogramétrica descrita, nos permitió obtener "in situ", y en pocos minutos, la geometría 3D de cada uno de estos paneles (Fig. 9), lo que nos facilitó, entre otras cosas, registrar con precisión los surcos de las superficies grabadas. Dicha precisión en el registro ha posibilitado también la identificación de, al menos, dos diferentes técnicas de grabado.

Es una figura barquiforme, que no habíamos detectado anteriormente como tal, la que nos llevará a uno de los ejes centrales de nuestro trabajo de investigación, pues si cuando a través del estudio fotogramétrico y la reconstrucción de la misma podemos concluir que se trata de una embarcación, debemos considerar la posibilidad de plantearnos si las representaciones que tenemos localizadas en el sureste de la península arábiga tenían relación con las encontradas en otros puntos del Mediterráneo y el Atlántico, si hubo influencias entre ellas a través de comunicación marítima y terrestre, o si, por el contrario, son fruto todas

ellas de una casualidad evolutiva del pensamiento humano.

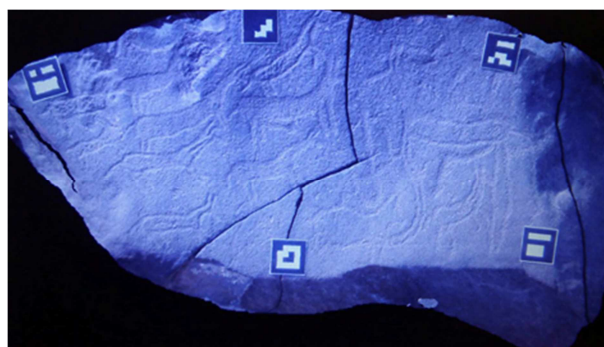


Figura 9: Geometría de uno de los paneles generada por la Tablet EyesMap en tiempo real.

En la última campaña, que se llevó a cabo en noviembre de 2016, para facilitarnos, precisamente, la identificación de relieves y marcas no visibles, probamos la aplicación DStretch. Se trata de un plugin creado por Jon Harman y cuyo principio operativo consiste en la intensificación del contraste de las variables cromáticas presentes en un archivo gráfico (Martínez *et al.* 2013), que hace posible ver detalles no captables a simple vista por nuestros ojos.

Aplicamos dicho plugin (Fig. 10), que está disponible en diferentes plataformas operativas, tanto en la obtención de nuevas imágenes de los petroglifos, como en el tratamiento de las que ya teníamos de otras campañas anteriores, y los resultados han sido francamente increíbles, pues a través de los diferentes filtros de color y con fotos obtenidas, tanto con cámara digital como con un smartphone, se hacían visibles detalles que no eran apreciables en tomas anteriores, aunque se hubiesen llevado a cabo en las mejores condiciones posibles (Fig. 11).



Figura 10: Filtro de la app dStretch for Android aplicado a los grabados de uno de los paneles.

En esta última intervención, de noviembre de 2016, en Khatm al Melaha, contamos con la inestimable colaboración de Jorge Angás, director de 3Dscanner Technologies <http://3dscanner.es/>, una empresa Spin-off de la Universidad de Zaragoza, que lleva a cabo proyectos de ingeniería y patrimonio (Angás 2012), y pudimos disponer de su magnífico trabajo con un drone sensefly eBee, drone de ala fija ultraligero, que obtiene

imágenes RGB que al ser procesadas por el propio sistema operativo realiza ortofotos y mapeado 3D (Fig. 12).



Figura 11: DStretch for Android aplicado en el posible barquiforme.

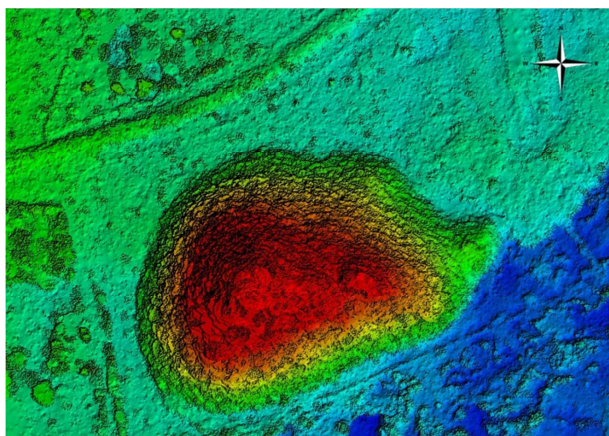


Figura 12: Modelo digital de superficie realizado con un drone Sensefly eBee por Jorge Angás.

La fotogrametría digital aérea y el modelo digital de superficie (MDS), que se realiza actualmente en gran parte de los sitios arqueológicos en proceso de investigación, se han convertido, en estos últimos años, en herramientas básicas en el desarrollo del trabajo de documentación arqueológica, tanto por la precisión y

calidad de la información que se obtiene, como por la perspectiva que nos ofrece en la interpretación del territorio desde el estudio a través de la Arqueología del Paisaje.

La importancia nuestro trabajo radica, por un lado, en la posibilidad de investigar en una zona arqueológica inédita, y por otro, en la cantidad y calidad de la información que nos aportan los petroglifos de Khatm al Melaha, con una proyección simbólica que nos pone en contacto con el arte rupestre mediterráneo y europeo, lo que nos plantea la posibilidad del establecimiento de contactos entre ambas zonas o, por el contrario, un desarrollo del pensamiento autónomo y coetáneo.

4. Conclusiones

Nuestros principales objetivos, con el trabajo que llevamos a cabo en Khatm al Melaha, es dar a conocer esta zona arqueológica inédita y llevar a cabo su documentación implementando una tecnología concreta con base fotogramétrica y de escaneado 3D.

En una primera fase, de toma de datos, se realizó una inspección visual de la zona y se seleccionaron 22 paneles de petroglifos, tanto por su interés iconográfico como por sus características morfológicas, realizando un ensayo de captura de datos para su modelado 2D y 3D con el nuevo equipo EyesMap. En una segunda fase se realizó un mapeado 3D con un drone de alafija y se utilizó la app dStrecht para mejorar la visualización de elementos no visibles en los grabados. Y, como paso ulterior, será llevado a cabo un estudio más detallado desde la óptica de la Arqueología del Paisaje (Criado 2012), abordando, desde dicho marco teórico, su emplazamiento, iconografía y contexto histórico.

Agradecimientos

Este trabajo es posible gracias a la colaboración con **Sharjah Archaeology Authority**, del Emirato de Sharjah, Emiratos Árabes Unidos.

Se realiza dentro de los proyectos:

- HAR2015-65649-C2-2-P(MINECO/FEDER)
- S2015/HUM-3377(CAM/FEDER)

References

- ANGÁS PAJAS, J., 2012. Nuevas técnicas de documentación geométrica y análisis del arte rupestre. Jornadas técnicas para la gestión del arte rupestre, patrimonio mundial. (Alquezar, Huesca, 2012), pp. 61-72 https://www.academia.edu/7530177/Nuevas_t%C3%A9cnicas_de_documentaci%C3%B3n_geom%C3%A9trica_y_an%C3%A1lisis_del_arte_rupestre [5/05,2017].
- APARICIO RESCO, P., 2013. Arqueología virtual para la documentación, análisis y divulgación del patrimonio: el horno de cal de Montesa (Valencia). Available: <http://www.editarx.es/cat%C3%A1logo-de-libros/monograf%C3%ADas/arqvir-detail> [5/28, 2016].
- BRADLEY, R., CRIADO BOADO, F., FÁBREGAS, R. (1994). "Los petroglifos como forma de apropiación del espacio: algunos ejemplos gallegos. Trabajos de Prehistoria, 51(2)", pp. 159-168. Disponible: <https://www.academia.edu/2295429> [5/28, 2016].
- CABEZOS BERNAL, P.M. and CISNEROS VIVÓ, J.J., 2012. Fotogrametría con cámaras digitales convencionales y software libre. Available: <http://dx.doi.org/10.4995/ega.2012.1407> [5/28, 2016].
- CRIADO BOADO, F., 2012. Arqueológicas. La Razón Perdida. Barcelona: Bellaterra. Available: <http://www.arqueologicas.com/> [5/28, 2016].

- CRIADO BOADO, F, MARTÍNEZ CORTIZAS, A. and GARCÍA QUINTELA, M.V., 2013. Petroglifos, paleoambiente y paisaje: estudios interdisciplinarios del arte rupestre de Campo Lameiro (Pontevedra). TAPA-INCIPIT. Available: http://libros.csic.es/product_info.php?products_id=640 [5/28, 2016].
- DOOD, J. and DUEÑAS GARCÍA, M.DJ., 2014. New discoveries, new directions: Rock art research on Bornholm 2013 – 2014. *Adoranten*, 112-22. Available: <http://search.proquest.com/openview/d76fb6e2ac69ee9a7f0011a7944136bb/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2032487> [5/28, 2016].
- E-CAPTURE, 2016. Especificaciones técnicas de la Tablet EyesMap: Manual de usuario EyesMap. Available: <http://ecapture.es> [4/14, 2016].
- FARJAS, M., N. QUESADA, M. ALONSO, A. DIEZ and CARPA 2010. New Technologies Applied to Artefacts: Seeking the Representation of a Column's Capital, in: Nicolucci, F. and S. Hermon (eds.), *Beyond the Artifact. Digital Interpretation of the Past*. Proceedings of CAA2004, Prato 13–17 April 2004. *Archaeolingua*, Budapest, pp. 21-27.
- KRISTIANSEN, K., LARSSON, T.B., 2005. La Emergencia de la sociedad del Bronce. Viajes, transmisiones y transformaciones. Bellaterra: Barcelona. Available: <http://www.ed-bellaterra.com/php/lilibresInfo.php?idLlibre=292> [5/28, 2016].
- MARTÍNEZ COLLADO, F.J., MEDINA RUÍZ, A.J., and SAN NICOLÁS DEL TORO, M., 2013. Aplicación del plugin DStretch para el programa ImageJ al estudio de las manifestaciones pictóricas del abrigo Riquelme (Murcia). *Cuadernos de Arte Rupestre, Revista Digital*. Available: http://carmesi2.regmurcia.com/recursos/arterupestre/6/MartinezCAR201306_13.pdf [17/6, 2017].
- RODRÍGUEZ LÓPEZ, F.I., 2014. Representación 3D de petroglifos: propuesta de metodología de modelización de los grabados del Valle de Tamanart, Marruecos. Trabajo Fin de Máster, 2014. Universidad Politécnica de Madrid. Available: <http://oa.upm.es/30703/> [5/28, 2016].
- SANTOS ESTÉVEZ, M., 1998. Los espacios del arte: El diseño del panel y la articulación del paisaje en el arte rupestre gallego. *Trabajos de Prehistoria*. **55**(2): 73-88. Available: <http://hdl.handle.net/10261/6752> [5/28, 2016].
- SANTOS ESTÉVEZ, M., 2004. Arte rupestre, estilo y construcción social del espacio en el Noroeste de la Península Ibérica. Tesis doctoral.
- SANTOS ESTÉVEZ, M., 2007. Petroglifos y paisaje social en la prehistoria reciente del noroeste de la península ibérica. *Trabajos de Arqueología e Paisaxe. Trabajos de Arqueología e Patrimonio*, 38: 220. Available: <http://hdl.handle.net/10261/37908> [5/28, 2016].

ANALYSIS OF REPEATABILITY ON VIDEOGRAMMETRY FOR INFANTS' CRANIAL DEFORMATION

ANÁLISIS DE REPETIBILIDAD EN VIDEOGRAMETRÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA DEFORMACIÓN CRANEAL EN NIÑOS

Inés Barbero-García^{a,*}, José Luis Lerma^a, Ángel Marqués Mateu^a, Pablo Miranda^b

^a Photogrammetry & Laser Scanning Research Group (GIFLE), Department of Cartographic Engineering, Geodesy and Photogrammetry, Universitat Politècnica de València, Cmno Vera, 46022, Valencia, Spain. inbargar@topo.upv.es; jllerma@cgf.upv.es; amarques@cqi.upv.es

^b Hospital Universitari i Politècnic/Instituto de Investigación Sanitaria La Fe, Avenida Fernando Abril Martorell, Valencia, Spain mirandalloret@gmail.com

Abstract:

Cranial deformation affects a large number of infants. The methodologies commonly employed to measure the deformation include, among others, calliper measurements and visual assessment for mild cases and radiological imaging for severe cases, where surgical intervention is considered. Visual assessment and calliper measurements usually lack the required level of accuracy to evaluate the deformation. Radiological imaging, including Computed Tomography (CT) and Magnetic Resonance Imaging (MRI), are costly and highly invasive. The use of smartphones to record videos that can be used for three-dimensional (3D) modelling of the head has emerged as a low-cost, non-invasive methodology to extract 3D information of the patient. To be able to analyse the deformation, a novel technique is employed: the obtained model is compared with an ideal head. In this study we have tested the repeatability of the process. For this purpose, several models of two patients have been obtained and the differences between them are evaluated. The results show that the differences in the ellipsoid semiaxis for the same patient are usually below 4 mm, although they increase up to 6.4 mm in some cases. The variability in the distances to the ideal head, which are the values used to evaluate deformity, reaches a maximum value of 2.7 mm. The errors obtained are comparable to those of classical measurement techniques and show the potential of the methodology in development.

Keywords: Photogrammetry, Low-cost, Plagiocephaly, 3D modelling

Resumen:

La deformación craneal afecta a un elevado porcentaje de lactantes, a pesar de esto, no existen estándares para su medición. Existen diversas metodologías empleadas para el análisis de este tipo de deformación, que van desde el análisis visual o la medición con calibre en casos leves, a pruebas radiológicas en casos más graves, en los que se plantea la posibilidad de una intervención quirúrgica. El análisis visual y la medición con calibre a menudo carecen de la precisión requerida para evaluar la deformación, mientras que las pruebas radiológicas (Tomografía Axial Computarizada, TAC, o Resonancia Magnética, RM) son altamente invasivas y tienen un alto coste. Otras soluciones como la fotografía tridimensional (3D) incluyen complejos sistemas de varias cámaras, lo que también supone un coste elevado. La posibilidad de utilizar videos tomados con teléfonos inteligentes para la creación de modelos 3D craneales se ha convertido en una posibilidad para obtener información 3D del paciente de forma precisa y con un coste bajo. Para analizar la deformación se ha planteado una metodología que consiste en calcular las distancias entre el modelo generado y una forma craneal ideal. En este estudio se ha llevado a cabo el análisis de la repetibilidad del proceso de obtención del modelo y de la cabeza ideal ajustada, para ello se han obtenido varios modelos 3D de dos pacientes y se han evaluado las diferencias entre ellos. Los resultados muestran unas diferencias en los semiejes de los elipsoides de aproximadamente 4 mm, aunque este error llega a incrementarse hasta 6.4 mm en algunos casos. La variabilidad en las distancias del modelo a la cabeza ideal, empleadas para medir la deformidad tienen un máximo de 2.7 mm. Las precisiones obtenidas con esta metodología son comparables a las obtenidas mediante técnicas de análisis tradicionales y muestran el potencial de la metodología en desarrollo.

Palabras clave: Fotogrametría, Bajo coste, Plagiocefalia, Modelado 3D

1. Introduction

Cranial deformation includes several conditions and pathologies that affect a large percentage of infants. The

most common condition is deformational plagiocephaly (DP) which is caused by positional factors. The number of children affected by this type of deformation increased drastically after 1990 as a consequence of the American Academy of Pediatrics campaign "Back to Sleep". The

* Corresponding Author: Inés Barbero-García, inbargar@topo.upv.es

campaign recommended supine sleeping position in order to prevent Sudden Death Syndrome and it spread to many countries (Pathmanaban *et al.* 2016).

Other types of deformation are caused by premature closing of the cranial sutures, which is known as craniosynostosis.

In most cases, the effects of the deformational plagiocephaly are aesthetical and can be corrected by active repositioning or the use of orthotic helmets (Schaaf *et al.* 2010). In contrast, craniosynostosis, which can cause major problems such as elevated intracranial pressure, usually requires surgical intervention for its correction.

Several methodologies are used for the analysis of cranial deformation including: visual assessment, caliper measurements, flexicurve, moulding devices, 3D photography and radiological imaging (Siegenthaler, 2015).

Despite of the different methodologies in use there are no standards for the measurement of the deformation. (Szpalski *et al.*, 2011). For mild cases, deformation is usually evaluated by visual assessment or using calipers but experts disagree on the effectiveness of these methodologies.

For severe cases, especially when surgical intervention is needed, radiological imaging is used. Radiological imaging (Computed Tomography or Magnetic Resonance Imaging) is considered the most accurate method to extract 3D measurements of the skull. However, this methodology has important disadvantages. It is highly invasive as, due to the age of the patients, it is necessary the use of anaesthesia to put the patient to sleep. The use of radiation is also to be avoided in infants. Moreover, the methodology is costly, as it requires very specific equipment (Moghaddam *et al.* 2014).

There is a need for a non-invasive, accurate methodology that allows the correct evaluation of the deformation and the effectiveness of the different treatments (Plank *et al.* 2006).

3D modelling is considered an interesting option as it is accurate and non-invasive. The main problem of the method is the acquisition of well-focused images in real clinical conditions, as the infants are usually in constant movement during the medical consultation (Schaaf *et al.* 2010). To deal with this issue complex setups of professional cameras or combinations of camera and laser are used. Due to the equipment employed, the method is costly.

The possibilities of a low-cost, non-invasive, smartphone based photogrammetric tool for cranial deformation analysis are presented in other studies (Barbero-García *et al.* 2017). Slow-motion videogrammetry recorded with a smartphone allows the quick acquisition of well-focused images of the moving infants in real clinical conditions. Moreover, no special equipment or lighting conditions are required. The images are later used to create 3D models for analysis of cranial deformation in an accurate, repeatable, low-cost and non-invasive way.

Barbero-García *et al.* (2017) presented the calculation of differences to an ideal head, represented by an adjusted three-axis ellipsoid. The methodology has been pointed

as an interesting option for cranial deformation, but its accuracy and repeatability are still being studied.

In this study, we evaluate the repeatability in the achieved 3D models. For this purpose, we have compared different models and ellipsoids of two different patients, obtained from different videos and from different frame selection.

2. Methodology

Two patients were studied, for each one several 3D models and fitted ellipsoids were obtained. The distances between the models and the fitted ellipsoids, used to calculate the deformation, were calculated and compared.

The ellipsoids were compared in two different ways. Firstly, the differences in the semiaxis were evaluated. Secondly, the whole set was registered and the distances between them were calculated (Fig. 1).

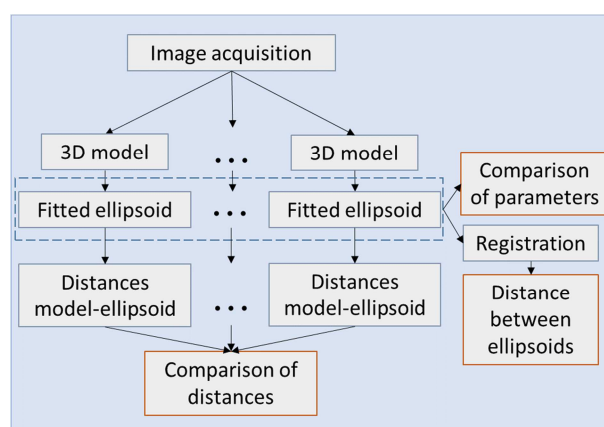


Figure 1: Methodology workflow.

2.1. Image acquisition

The video recording was carried out using a Smartphone Samsung Galaxy S7 with a resolution of 1280 x 738 pixels, 235 fps. Each video was recorded in less than a minute. No special lighting conditions and no tripod were required. The conditions were those of the doctor's office or the operating theatre.

A cap was placed on the patients head to avoid the effect of hair and provide some texture to facilitate the 3D modelling. Some coloured targets were also added.

Two patients were taken into account for this study. For the first patient three videos were recorded with different conditions: (1) with the patient lying, (2) with the patient standing (with help of an adult) and (3) under anaesthesia, in the operating theatre. For the second patient only one video, in the operating theatre, was taken.

All the videos were recorded during the same day, prior to the surgery to correct the cranial deformation of the patients.

The videos were later processed to extract the set of images used for modelling. The images were extracted automatically using a fixed frequency and bad-focused images were removed. Every set contained between 75 and 221 images.

2.2. Model creation

Once the images were extracted, they were processed with the software PhotoScan (Agisoft, Russia). The process consisted of three steps: (1) Image alignment, (2) Point cloud densification and (3) Mesh creation. In some cases, texture was added only for visualization purposes. After its creation, every model was visually checked for completeness.

A total of four models were created for patient one, including one for each of the first two videos and two for the third video. For patient two, eight models were created using different sets of images from the same video.

2.3. Ellipsoid fitting

The fitted ellipsoid is proposed as the representation of the ideal cranial shape. An adjustment of the ellipsoid is carried out using Least Square Adjustment (Bektas 2015). The norm L2 is used. The semiaxis of the adjusted ellipsoid can be extracted from the conical parameters. Finally, the best-adjusted ellipsoid is obtained for each 3D model (Fig. 2).

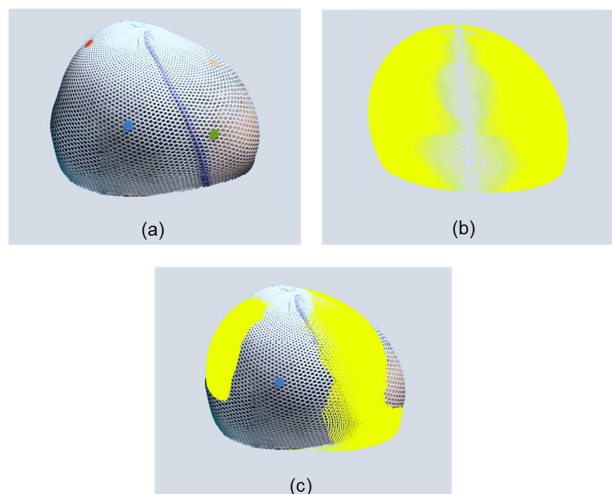


Figure 2: Ellipsoid fitting: a) 3D model; b) Ellipsoid; c) Overlaying model and ellipsoid.

2.4. Distances from the ellipsoid

The cranial deformation will be quantified as distances from the ellipsoid (Fig.3). The orthogonal distances, are therefore, calculated for every point of the model using the equations presented by Bektas (2014).

3. Results

Table 1 shows the results for patient one. In it, we can see the results of four different models created using different sets of images. The first set of images was extracted from a video taken with the patient lying. The second set was taken with the patient standing uphold. The last two sets were extracted from the same video, with the patient under anaesthesia. The number of images per model vary from 75 to 165.

The semiaxis of the adjusted ellipsoids show differences up to 6.4 mm. The largest difference is found between

the last video and the others. The largest difference between video 1 and 2 is 1.9 mm while the largest difference between the two models created using the third video is 1 mm.

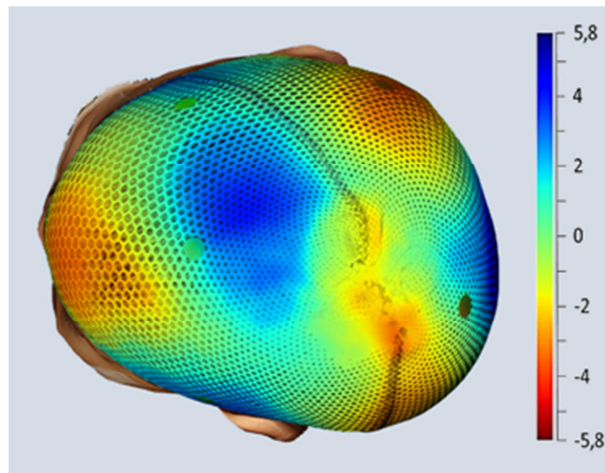


Figure 3: Distances to the ellipsoid represented as bathymetric colours (mm).

The distances to the adjusted ellipsoid, show a maximum difference between models of 3.3 mm. Especially important for the deformation analysis would be variability, given the standard deviation, for this parameter the largest difference is 0.5 mm.

The results for the second patient are shown in Table 2 and 3. The largest difference for the ellipsoid parameters is 3.8 mm. The differences in the distances to the ellipsoid are up to 1.6, with a maximum difference in the standard deviation of 0.2 mm. For the patient the distances between each ellipsoid and a reference one are also shown, the largest difference, 2.7 mm, is in the maximum distance.

Correlation between the number of images and the error was not found for any of the patients.

4. Discussion

This work studies the repeatability in the 3D models achieved and its fitted ellipsoid. The study is focused on the particular case of cranial deformation analysis where the robustness of the methodology is vital to consider it an option in real clinic conditions.

The differences in the calculation of the semiaxis are near to 3 mm in many cases, with an exceptional value of 6.4 mm for one semiaxis when different videos with different image acquisition conditions were compared. However, these error values are smaller for the comparison of distances from head to ellipsoid and in the comparison of distance from ellipsoid to ellipsoid.

Most important errors were registered when different videos were compared. This fact is, probably, due to the difference in image acquisition conditions. It was found that taking the images with the infant lying (video 1, patient 1) was not a good approach as the cap will fold and move as the infant changes position during the process. If this video is excluded, maximum difference in distances to the ideal ellipsoid is lower than 3 mm.

Table 1: Ellipsoid parameters and distances to the adjusted ellipsoid for patient one (mm).

	Number of images	Ellipsoid parameters			Distances to the fitted ellipsoid				Conditions
		Semixis 1	Semixis 2	Semixis 3	Mean	Std	Max.	Min.	
Video 1	140	60.9	68.8	97.9	-0.4	2.3	6.4	-9.3	Patient lying
Video 2	109	59.8	68.6	96	-0.4	2.4	5.6	-6.4	Patient standing
Video 3 Set 1	95	59.2	75	96.9	-0.3	2	5.7	-7.7	Under anaesthesia
Video 3 Set 2	221	59	74	96.8	-0.3	1.9	4.7	-6	Under anaesthesia

Table 2: Ellipsoid parameters, distances to the adjusted ellipsoid and distances for patient two (mm).

	Number of images	Ellipsoid parameters			Distances to the fitted ellipsoid			
		Semixis 1	Semixis 2	Semixis 3	Mean	Std	Max.	Min.
Set 1	136	64.1	78.2	90	-0.3	2.5	6.7	-7.5
Set 2	146	63.7	77.3	90.2	-0.2	2.5	6.4	-7.2
Set 3	165	63.5	77.9	90.5	-0.3	2.6	5.8	-7
Set 4	138	65.5	79.5	92.5	-0.3	2.6	6.5	-7.6
Set 5	125	63	76.6	88.7	0.2	2.4	5.1	-6.8
Set 6	114	63.7	77.2	89.4	-0.3	2.4	6.5	-7
Set 7	118	64.9	78.8	91.5	-0.3	2.6	6.6	-7.6
Set 8	75	64.6	78.6	90.1	-0.3	2.5	5.6	-6.9
Maximum difference		2.5	2.9	3.8	0.5	0.2	1.6	0.8

Table 3: Distances between each fitted ellipsoid and the one set as reference for patient two (mm).

	Mean	Std	Max.	Min.
Set 1	REF	REF	REF	REF
Set 2	-0,3	0,4	0,5	-2
Set 3	-0,3	0,4	0,4	-1,7
Set 4	0,8	0,8	2,9	-1,2
Set 5	-0,6	0,7	1	-2,6
Set 6	-0,3	0,4	0,4	-2,2
Set 7	0,4	0,6	1,6	-1,3
Set 8	-0,2	0,4	0,2	-2
All models	-0,07	0,53	2,90	-2,60

The number of images varied considerably among models but no relationship was found between this number and the obtained differences. Indeed, models with higher differences such as the one obtained for set 7 of patient two have an intermediate number of images (138). This fact may be explained because the number of images is always redundant and all the models are complete.

Cranial deformation is usually measured using callipers. These tools have a maximum precision of 1 mm in ideal conditions although the error in the identification of the cranial landmarks has to be added. According to this, an average error of 3 mm in the presented methodology makes it comparable to traditional methods. The amount of useful data obtained by 3D modelling is much larger.

With a caliper 3 to 8 measures are usually obtained, whereas 3D models have an average of 30.000 points and show the whole head.

In other studies, the error in cranial landmarks coordinates using much more costly 3D photogrammetric equipment was found to be up to 4 mm (Aldridge *et al.* 2005).

Furthermore, it has been found that differences in the area represented in the model affect greatly the results. For this reason, it is important to define correctly the area of the head that should be taken into account, excluding the neck and the face of the infant. This can be easily done by placing the cap correctly and taking into account only the area covered by it.

Other improvements should be tested and incorporated to the process in the future. These include the use of L1 norm in Least Square Adjustment, which could help to reduce the effect of blunders.

5. Conclusions

Videogrammetry through smartphones is a useful tool to create 3D models for cranial deformations analysis as well as for other medical applications. The ellipsoid fitting approach is a novel approach to evaluate the deformation in an objective, repeatable and automatic manner, which provides information for the whole head.

The methodology has shown an approximate repeatability error of 3 mm. This accuracy is comparable with methods traditionally used to evaluate this type of deformation such as calliper. Furthermore, this methodology provides a larger quantity of information as

it shows the deformation for every single point of the model.

As the methodology is still in development, there are real possibilities to increase accuracy by improving the definition of the modelled area and using improved adjustment methods that are less affected by noise.

Acknowledgements

This work was supported by Subprogram C (No. C10) for the development of coordinated actions between the UPV and the IIS La Fe.

References

- ALDRIDGE, K., BOYADJIEV, S.A., CAPONE, G.T., DELEON, V.B. and RICHTSMEIER, J.T., 2005. Precision and error of three-dimensional phenotypic measures acquired from 3dMD photogrammetric images', *American Journal of Medical Genetics*, **138** A(3), pp. 247–253. doi: 10.1002/ajmg.a.30959.
- BARBERO-GARCÍA, I., LERMA, J.L., MARQUÉS-MATEU, Á. and MIRANDA, P., 2017. Low-Cost Smartphone-Based Photogrammetry for the Analysis of Cranial Deformation in Infants, *World Neurosurgery*, **102**, pp. 545–554. doi: 10.1016/j.wneu.2017.03.015.
- BEKTAS, S., 2014. Orthogonal distance from an ellipsoid, *Boletim de Ciências Geodésicas*, **20**(4), pp. 970–983. doi: 10.1590/S1982-21702014000400053.
- BEKTAS, S., 2015. Least square fitting of ellipsoid using orthogonal distances, *Boletim de Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná*, **21**(2), pp. 329–339. doi: 10.1590/S1982-21702015000200019.
- MOGHADDAM, M.B., BROWN, T.M., CLAUSEN, A., DASILVA, T., HO, E. and FORREST, C.R., 2014. Outcome analysis after helmet therapy using 3D photogrammetry in patients with deformational plagiocephaly: The role of root mean square, *Journal of Plastic, Reconstructive and Aesthetic Surgery*. Elsevier Ltd, **67**(2), pp. 159–165. doi: 10.1016/j.bjps.2013.09.036.
- PATHMANABAN, O.N., BURKE, K.A., LEACH, P., THORNE, J. and KAMALY-ASL, I.D., 2016. Non-synostotic posterior brachycephaly with hindbrain herniation, *World Neurosurgery*. doi: 10.1016/j.wneu.2016.10.027.
- PLANK, L.H., GIAVEDONI, B., LOMBARDO, J.R., GEIL, M.D. and REISNER, A., 2006. Comparison of infant head shape changes in deformational plagiocephaly following treatment with a cranial remolding orthosis using a noninvasive laser shape digitizer. *The Journal of craniofacial surgery*, **17**(6), pp. 1084–1091. doi: 10.1097/01.scs.0000244920.07383.85.
- SCHAAF, H., PONS-KUEHNEMANN, J., MALIK, C.Y., STRECKBEIN, P., PREUSS, M., HOWALDT, H.P. and WILBRAND, J.F., 2010. Accuracy of three-dimensional photogrammetric images in non-synostotic cranial deformities, *Neuropediatrics*, **41**(1), pp. 24–29. doi: 10.1055/s-0030-1255060.
- SIEGENTHALER, M.H., 2015. Methods to Diagnose, Classify, and Monitor Infantile Deformational Plagiocephaly and Brachycephaly: A Narrative Review, *Journal of Chiropractic Medicine*. National University of Health Sciences, **14**(3), pp. 191–204. doi: 10.1016/j.jcm.2015.05.003.
- SZPALSKI, C., WEICHMAN, K., SAGEBIN, F. and WARREN, S.M., 2011. Need for standard outcome reporting systems in craniosynostosis, *Neurosurgical focus*, **31**(2), p. E1. doi: 10.3171/2011.6.FOCUS1192.

VIABILIDAD Y OPERATIVA EN LA DIGITALIZACIÓN DE CASOS RUPESTRES PREHISTÓRICO DEL “ARTE SUREÑO”: RECETAS DIGITALES DESDE TÉCNICAS SFM Y PLATAFORMAS OPEN SOURCE

OPERATIONAL FEASIBILITY AND DIGITIZATION PROCESS OF PREHISTORIC ROCK ART IN “ARTE SUREÑO”: DIGITAL GUIDELINES FROM SFM TECHNIQUES AND OPEN SOURCE PLATFORMS

Alfredo M. Maximiano Castillejo^{a,*}, Camilo Barcia García^b

^a LaQU; Universidad Autónoma de Barcelona. Spain. g4amaximiano@gmail.com

^b Dpto. Prehistoria y Arqueología; UNED. Spain. camilobarciagarca@gmail.com

Abstract:

We present a case study on digitalization of Southern Rock Art (“Arte Sureño”) in a prehistoric rock shelter from Los Barrios, Cádiz (southern Iberian Peninsula); there we use SfM techniques to obtain some digital products for both analytic and divulgation goals. This way, we highlight some opportunities that low-cost devices (e.g. no-professional digital camera) and open software have introduced in archaeology today. We made it to converge in a working process to register and manage rock art expressions and their immediate surroundings (i.e. natural stone blocks, walls, niches...).

From this action, we not only support our work in digital 3D about multiple and varied entities that make up the scenario and neighbour context of rock art through the use of multiple low cost / free resources, but also, we intend to adjust all this operative for the processes of investigation, protection and diffusion on the varied cases that make up this unique singular artistic heritage.

Key words: Arte Sureño, Photogrammetry, Open Source, 3D Modelling

Resumen:

Presentamos el proceso de digitalización de arte rupestre prehistórico de un caso de estudio, ubicado en uno de los abrigos pertenecientes a un complejo rupestre singular de la Península Ibérica (Los Barrios, Cádiz). Para ello, empleamos técnicas SfM como medio de obtención de productos digitales analíticos y realísticos/divulgativos. Con esto, pretendemos destacar la oportunidad del uso de dispositivos de bajo coste (cámara digital no profesional), junto a software de licencia libre en un proceso de trabajo, desde el cual se documentan y gestionan las evidencias artísticas (arte rupestre) y su contexto próximo (soporte pétreo).

Desde esta actuación, no sólo sustentamos nuestro trabajo en digital 3D acerca de múltiples y variadas entidades que conforman el escenario y contexto próximo del arte rupestre mediante el uso de múltiples recursos “low cost”/libres, sino que además, pretendemos ajustar toda esta operativa para los procesos de investigación, protección y difusión sobre los variados casos que componen este singular patrimonio pictórico.

Palabras clave: Arte Sureño, Fotogrametría, Open Source, Modelos digitales 3D

1. Introducción

El *estado del arte* actual acerca de las sinergias entre recursos computacionales y la digitalización de conjuntos de evidencias pertenecientes al patrimonio histórico-artístico-arqueológico, demuestra no sólo la convergencia entre ambas esferas, sino además, la necesaria complementariedad e incidencia en el desarrollo de nuevas vías en lo relacionado a medios de captura, gestión de contenidos (*databanks*), contextos analíticos/interpretativos, y formas de visualizar resultados. En esta tesitura, el abanico de opciones a desarrollar desde la geomática para con los problemas patrimoniales conllevan una explosión de soluciones que cambian sustancialmente las formas de afrontar los problemas arqueológicos. Dentro de este amplio

espectro, nos encontramos con entornos de solución que posibilitan un control del error en la representación de escenas 3D inferior a las micras bajo el uso de medios de captura que siendo accesibles, aún son caros y de complejo manejo (toma de datos y posproceso en laboratorio) desde operativas que hacen estrictamente necesario el trabajo de especialistas. Junto a la captura y preprocesado de nubes de puntos, también debemos considerar el software para el posproceso. Generalmente y desde la arqueología, recurrimos a soluciones comerciales que nos facilitan/guían en la gestión de contenidos, pero estos entornos de pago, en ocasiones y aún bajo licencia universitaria, son medios costosos y probablemente, (en nuestra opinión) lo que puede ser más significativo para los arqueólogos es que no seamos capaces de obtener un rendimiento óptimo

* Corresponding Author: Alfredo M. Maximiano Castillejo, g4amaximiano@gmail.com

de dichas herramientas. Ante estas circunstancias, valoramos la opción de usar medios de captura y gestores de contenidos que aun siendo aparentemente más limitados/rudimentarios, se ajustan a los problemas que queremos resolver.

Es evidente, que tener un error de micras es mejor que un desfase en el modelaje entorno a milímetros o centímetros, pero atendiendo al tipo de problema patrimonial planteado, quizás debamos partir de la siguiente pregunta: *¿Cuál es el nivel de detalle que debemos usar para resolver nuestro problema?* Creemos que la respuesta nos sorprendería, ya que ciertas problemáticas inherentes al patrimonio mueble/inmueble histórico-artístico-arqueológico no precisan de un nivel de detalle adscrito a una escala de micras.

Desde estas consideraciones, hemos puesto en marcha un trabajo sistemático¹ cuyo objeto de estudio está compuesto por un registro (pre)histórico de más de 250 estaciones con arte parietal (pintura y grabados). De tal modo que, la opción de trabajar en digital se constituye en una de las líneas principales de actuación sobre un patrimonio con múltiples problemáticas. En esta propuesta queremos destacar dos: *i)* emplazamiento, ya muchas estaciones se localizan en el medio natural con muy compleja/difícil accesibilidad, y *ii)* casos con una precaria conservación en una clara situación de riesgo de pérdida absoluta de los conjuntos artísticos, debido a ciertos factores de degradación natural, pero especialmente por causas antrópicas (vandalismo).

En este artículo tratamos con un caso de estudio concreto, el *Abrigo II* del Conjunto de Abrigos rupestres de Bacinete (Los Barrios, Cádiz), desarrollando aspectos de captura, gestión y tratamiento analítico de datos, integrados en un flujo de trabajo (*workflow*) basado en datos procedentes desde SfM, y posprocesado (gestión de nubes de puntos y modelaje 3D) desde software libre de código abierto.

2. Bacinete II: Digitalizar como medio y no como finalidad

Partimos de la premisa de que la digitalización del patrimonio es una oportunidad en aras a mostrar, reproducir, explicar y estudiar fenómenos del pasado que de otro modo no serían observables. Así, poniendo de manifiesto sus fortalezas, la digitalización en Bacinete II aportará (Maximiano and Barcia 2017; en prensa):

Una tecnología de registro fidedigna acerca de la realidad material sin contacto directo, ni incidencia sobre los conjuntos rupestres, garantizando un “riesgo cero”;

Un planteamiento de registro total y contextual acerca de las evidencias artísticas y su entorno pétreo (abrigos, cuevas, covachas, paredes de roca, etc.), proporcionando un documento digital 3D en soporte estable, actualizado, accesible y potencialmente inmersivo (Realidad Virtual);

¹ Proyecto de tesis doctoral iniciado por uno de los autores (C. B. G.) desde la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED). En ella, se desarrollan de manera extensa y exhaustivamente las ideas que brevemente enunciamos aquí.

El establecimiento de una metodología sistemática, relativamente rápida de captura y gestión de datos que posibilite, tanto la estandarización de los contenidos, como además la integración de los mismos (y sus derivados) en múltiples entornos digitales para distintos fines (investigación, protección, divulgación).

La convergencia de los tres puntos anteriores posibilitará un enriquecimiento sustancial acerca de los conjuntos artísticos del “Arte Sureño”, mostrando beneficios en torno a nuevas vías en la normalización de datos (imágenes pictóricas), en lo que compete a los procesos de investigación (disponibilidad de un documento métrico, geométrico que reproduce fielmente la realidad), a la par que oferta estrategias novedosas acerca de cómo preservar (digitalmente) los conjuntos de evidencias artísticas. Además, se faculta el desarrollo de nuevos hitos de cara a la difusión, y sensibilización de este singular patrimonio hacia el gran público.

Somos conscientes de que la digitalización del patrimonio histórico-artístico debe ir más allá de una mera recreación/reproducción de objetos, entidades y conjuntos en 3D, ya que en ocasiones, se ofrece una salida gráfica con una cuidada estética, pero que puede convertir el producto virtual en un fin en sí mismo. Frente a ello, lo que hace verdaderamente útil un proceso de digitalización es que dichos productos digitales se constituyan en medios o herramientas válidas para alcanzar fines. Pero, *¿Cómo ir más allá de una recreación digital per se?*

Actualmente, muchos productos digitales patrimoniales ofertan escenas virtuales que no van más allá de funciones tipo: hacer “zoom”, “rotar un objeto u orbitar a su alrededor”, “cambiar la visualización” (iluminación, color, representación...) o “aportar breves explicaciones” sobre una u otra parte del elemento. Frente a esto, el reto reside en el uso de recursos computacionales para facilitar las tareas de investigación (detección, identificación, clasificación, etc.), realizar análisis de múltiples variables actuando simultáneamente (*big data*, simulaciones, testeo de hipótesis...), y/o el empleo de realidad virtual y aumentada, orientadas al contraste de procesos, a la divulgación inmersiva y personalizada... Ciertamente, todos ellos son campos ya explorados, pero aún en el caso del Arte Sureño se encuentran poco explotados (Maximiano and Barcia 2017; *en prensa*). Desde el caso de *Bacinete II* proponemos un ajuste sobre los tipos de soluciones alcanzables, atendiendo a las problemáticas y necesidades que presenta este caso.

Bacinete II se integra en un complejo de abrigos próximos entre sí que presentan decoración (un total de 8 casos), conocidos como: *Conjunto Rupestre de Bacinete* (Fig. 1). Se trata de un conjunto de bloques y afloramientos de areniscas emplazados en las estribaciones occidentales de la Sierra del Niño, sito en el Parque Natural de los Alcornocales (Los Barrios, Cádiz). Estas manifestaciones artísticas ya fueron reseñadas hace casi un siglo por Breuil and Burkitt (1929), contando desde entonces con numerosos trabajos científicos sobre el lugar. La literatura atribuye a los conjuntos artísticos representados al arte esquemático postpaleolítico y a dinámicas de sociedades complejas, cronológicamente situadas entre el Neolítico y el Calcolítico (Díaz-Andreu and Lazaric 2014; Lazarich *et al.* 2015).

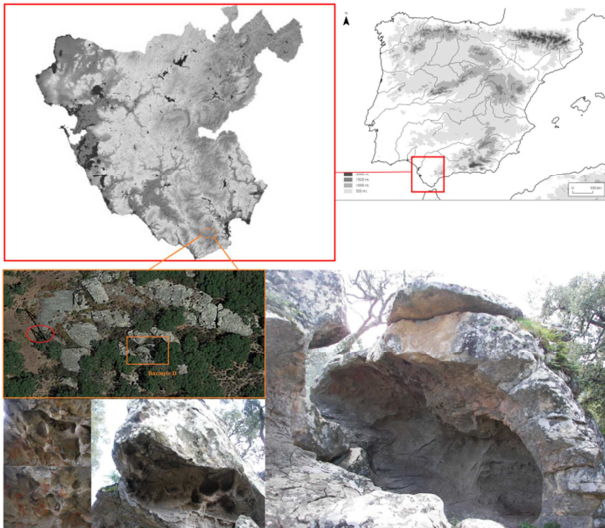


Figura 1: Localización del sitio, imagen aérea de los afloramientos y bloques rocosos. Detalles del abrigo.

Este abrigo rocoso es de pequeñas dimensiones – 2 m. (altura) x 4 m. (ancho) x 1 m. (profundidad), aprox.– en el que aparecen representados diversos motivos pictóricos de tendencia no-naturalista, plasmados mediante un pigmento rojo, bastante homogéneo. Aparentemente, en esta escena no existirían grabados (Lazarich *et al.* 2015; Solís 2009, 2015). Las características geométricas y morfométricas del abrigo se integran en un bloque de arenisca de considerables dimensiones. El eje mayor es de unos 9m de longitud (orientación E-W), y el eje menor es de unos 3.5m (orientación N-S), con una altura promediada en torno a 5m. El abrigo y sus pinturas ocupan la cara oriental del bloque. La morfometría del mismo es compleja desde una escala global – disposición en forma pseudo tubular, con presencia de parte de cornisa y otra parte de la misma, se encuentra desprendida cuyos restos del material se encuentra desperdigado en las inmediaciones – como también, en lo referido al detalle de sus paredes, las cuales presentan numerosos entrantes y salientes.

Es muy probable, que esta configuración a escala micro debió influir en el pasado sobre la elección de los emplazamientos de las pinturas, adaptándose a los diferentes planos y concavidades existentes en el soporte pétreo. Por otra parte, destacamos las particularidades geométricas del bloque de arenisca, yendo más allá de un volumen pseudo-homogéneo en forma de hornacina y de otros tantos casos con tendencia a un plano de superficie uniforme, en los cuales aparecen los motivos artísticos. Todo ello conlleva una serie de dificultades, que son a su vez, el contexto adecuado para testear la capacidad, tanto de los medios de captura, como la gestión de los contenidos en 3D.

La digitalización de Bacinete II, como en cualquier otro caso similar, responde a unas pautas y estrategias de actuación (Fig. 2). Estas etapas secuenciadas e interdependientes deben seguir una armonización en el flujo de trabajo, el cual ha de ser viable y ágil para las capacidades de alguien versado en el tema, pero no necesariamente especialista. Por ello, estructuramos la siguiente secuencia de trabajos, con la cual

pretendemos cumplir la premisa por la cual digitalizar es sólo un medio para alcanzar un fin determinado.

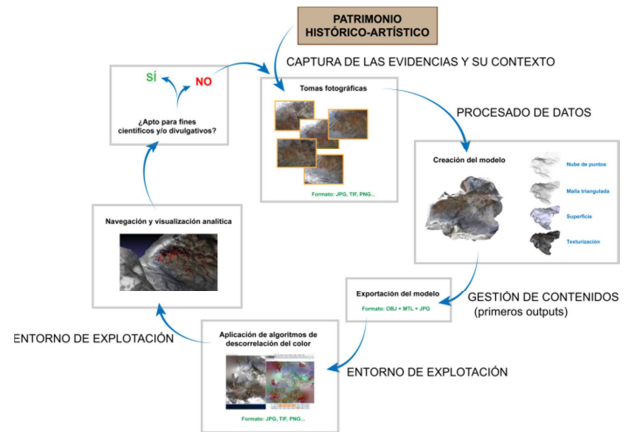


Figura 2: Esquema de trabajo de digitalización propuesto en Bacinete II.

3. Captura de datos y gestión de contenidos: Hacia la generación de los primeros productos digitales

La elección de la técnica de captura SfM para esta iniciativa se debe a cuatro aspectos básicos: *i)* Ajuste a la escala de resolución del problema planteado, *ii)* Metodología altamente contrastada (Agarwal *et al.* 2010), *iii)* Alta calidad, resolución y agilidad en la gestión de modelos tridimensionales de aspecto realista, y *iv)* Costes y accesibilidad, ya que es una técnica relativamente económica, implementable desde cámaras fotográficas digitales que cumplan con unos requerimientos mínimos, pero sin ser cámaras profesionales; y por último, disponibilidad de conjuntos de datos abordables desde diferentes soluciones de software libre. Son esos factores los que confieren a la SfM una gran versatilidad e idoneidad de cara al caso de estudio propuesto. Y es con ello, con lo que podemos evaluar las potencialidades de esta metodología como sustento principal en la captura de datos para con los demás casos de estudio que planteamos abordar dentro del *Arte Sureño*.

Somos conscientes de que el uso de escaneo láser es la opción más precisa, pero también es cierto, que su coste económico lo hace casi prohibitivo en muchos proyectos, además de contar con un procesado de datos que es mucho más complejo y menos accesible que desde la SfM. Aunque sostenemos que la cuestión no es dirimir qué tecnología es *mejor* o *peor*, sino responder: *¿Cuál de ellas se ajusta mejor a las necesidades y expectativas reales del proyecto?* Con el uso de SfM, aseguramos un control acerca del error/deformación en los modelos 3D. Atendiendo al tipo de objetivos a cubrir con esta iniciativa, hemos estimado unos valores asumibles en torno a <6mm a escala del bloque de arenisca para el estudio de las diaclasas, y de otras componentes geofomológicas; y en unos valores <1.4mm a escala de las evidencias pictóricas (a la entrega de este paper aún estamos pendiente de los resultados sobre precisión alcanzada en base a la lectura de conjuntos de puntos georreferenciados mediante Estación Total). Además, podemos acreditar la calidad geométrica de la réplica digital de los relieves de la pared rocosa (intersticios, hornacinas, entrantes y

salientes...), y garantizamos la fidelidad de las texturas (Pereira 2013; Remondino 2014; Torres *et al.* 2012). Todo ello desde un entorno ágil y dinámico en torno al flujo de trabajo, ya que cada salida (output) podrá ser fácilmente exportable e incorporada (input) a otras etapas del proceso (aplicación de algoritmos de falso color, detección de bordes, caracterización de motivos, etc.).

Todo el trabajo de captura se realizó con una cámara Kodak EasyShare P850 (5,1 MP, Óptico 12x, zoom digital de 3.3x, ISO: Auto, 50 a 800, Enfoque automático: AF TTL-, único y continuo, Multi-Zone, seleccionable (25 zonas), Obturación: 16 - 1/1000 seg). Los archivos fueron capturados en formato RAW. Las tareas de procesado de datos fueron efectuadas en un primer momento a pie de campo para el contraste de la actividad, mediante un portátil HP Intel® Core™ i7-6700HQ, 2.60 Ghz (OS 64 bits), de RAM 16 Gb y una GPU Nvidia GeForce GTX960M, 4096 Mb GDDR5 (principal) e Intel® HD Graphics 530 (apoyo), con 1 Tb HDD + 120 Gb SSD de disco duro. El posprocesado y generación de modelos y demás operaciones fueron realizadas con la misma máquina desde el laboratorio.

El procesado de datos SfM fue realizado desde nubes de puntos mediante el software de libre acceso *VisualSFM* (Wu 2011; 2013).

Se empleó *MeshLab* (Cignoni *et al.* 2008; Callieri *et al.* 2013) para la restitución de geometrías, volúmenes, texturas y la georreferenciación de la modelización. Se contempla el uso de Blender para determinadas acciones (de cara a la difusión patrimonial) que a fecha de entrega de esta propuesta aún está en proceso de realización.

La estrategia de trabajo pretendía resolver tres niveles de percepción de evidencias: una aproximación global en 3D al soporte donde se encuentran la escena (bloque), definiendo en un segundo nivel el sector donde están las pinturas (abrigo) y finalmente, obteniendo los detalles concretos de las pinturas en su marco próximo (friso). Así, en una primera captura de datos alcanzamos una caracterización geométrica del todo el bloque de arenisca al completo (60m³ aprox.), facilitando así la comprensión del encaje de las pinturas en su entorno, tanto dentro de todo el conjunto rupestre, cómo en el propio bloque como entidad autónoma y contenedora de las representaciones artísticas.

Para ejecutar estas capturas de datos, se realizó una baja densidad de tomas fotográficas (unas 45) sobre el conjunto del bloque (Fig. 3). A continuación, incrementamos la densidad de capturas centrándonos en el sector E. del bloque, donde se localiza el abrigo con pinturas (10m³ aprox.), pretendiendo recolectar el microrelieve completo de la pared que sirve de soporte al arte rupestre (Fig. 4), empleando unas 65 tomas fotográficas. Por último, llevamos a cabo un barrido exhaustivo (80 tomas) centrado en los paneles con motivos artísticos (4m³ aprox.) para disponer de un documento fidedigno de las evidencias artísticas (réplica virtual) que fuera útil, tanto para procesos de investigación científica, como para el ámbito de la conservación y la divulgación de contenidos.

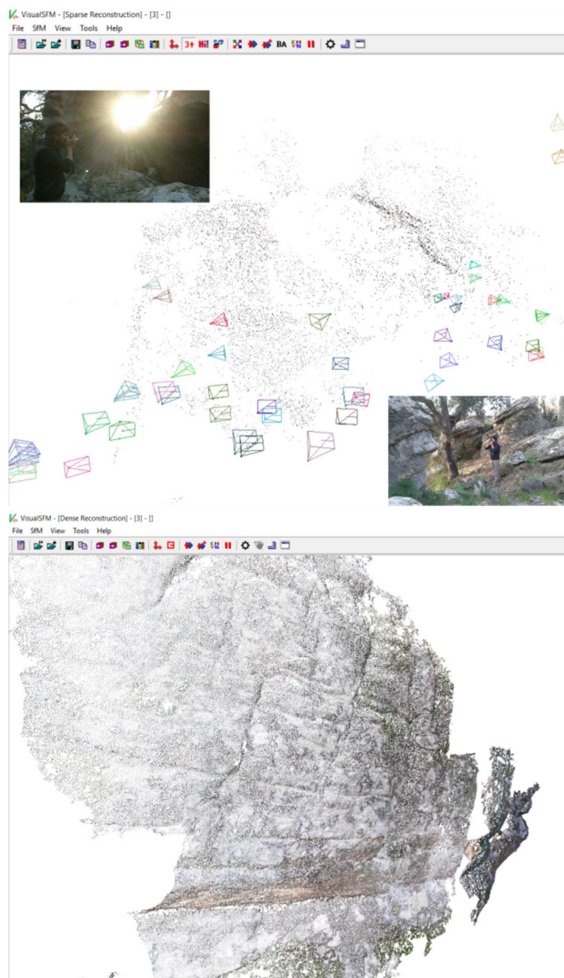


Figura 3: Toma de datos y gestión de nubes de puntos desde software libre VSfM

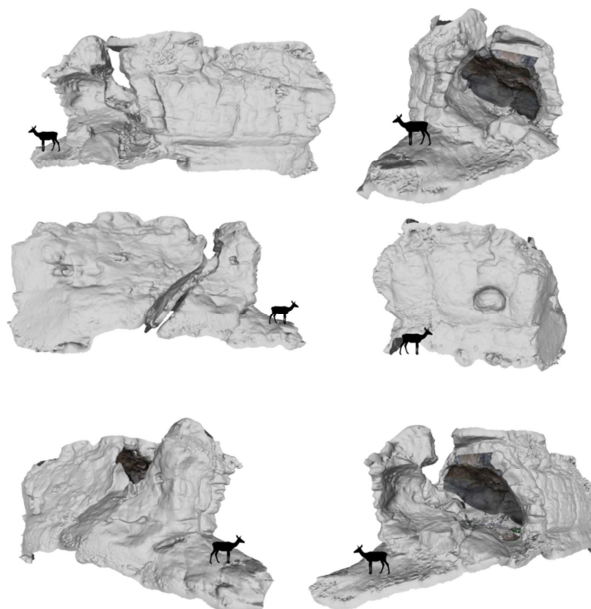


Figura 4: Modelo generado desde Meshlab, Caras orientadas del bloque en donde se encuentra el abrigo Bacinete II. (vista de abrigo en otra trama de color). Imagen tomada de Maximiano y Barcia 2017; en prensa.

Hacemos hincapié en que los modelos generados se han centrado en los motivos artísticos y en su contexto inmediato, somos conscientes que para la restitución completa del bloque de arenisca habría sido ideal contar con apoyo técnico aéreo cercano durante el proceso de captura – UAV- nos habría facilitado mucho el registro de ciertas partes en la zona superior del bloque (tapa) y de algunos sectores de los laterales más altos del conjunto. No obstante, para la documentación detallada del abrigo y los paneles con arte, consideramos que el uso de SfM (mediante cámara digital y operado experimentalmente) ha alcanzado los objetivos pretendidos.

El modelo obtenido, aparte de recrear las evidencias, permite la extracción de nuevos niveles de información, como por ejemplo: métrica y volumetrías sobre cualquier elemento/s del conjunto (desde el tamaño de los motivos hasta la medida de las paredes), además posibilita cuantificar y estimar la intensidad en la degradación sobre determinadas componentes estructurales, tanto de las pinturas, como del soporte pétreo.

En lo referente a aspectos de texturas y color de los motivos pictóricos, destacamos la oportunidad que ofrecen los modelos 3D y la ortofotografía en la puesta en marcha de pruebas digitales radiométricas sobre detección de falso color en torno a los tipos de pigmentos, y en la percepción de ciertas evidencias pictóricas que pueden no ser detectadas a través de las capacidades del ojo humano. Así, hemos realizado una serie de tratamientos exploratorios mediante el uso del software libre DStretch (Harman 2008; 2017) soportado desde el también software libre de procesamiento y análisis de imagen ImageJ (Abràmoff *et al.* 2004; Schneider *et al.* 2012). DStretch ha sido diseñado explícitamente para el análisis de arte rupestre, para el cual se aplican algoritmos de descorrelación sobre las longitudes de onda del espectro visible registradas en una imagen, con ello se puede descomponer el color de los píxeles, acentuando sus diferencias y confiriéndoles un falso color resaltando los matices que resultaban difusos e incluso, ocultos a simple vista (Gómar *et al.* 2011; Harman 2008; Quesada 2010; Martínez *et al.* 2013). Al aplicar los algoritmos de descorrelación y el ajuste de parámetros en DStretch directamente sobre las texturas del modelo digital 3D, y la ortofoto obtenida mediante SfM, nos permite la navegación (vía MeshLab) en la escena 3D, y percibir mejor, tanto elementos difuminados/ocultos a la vista, como la relación entre las pinturas prehistóricas en base a la morfología y el microrelieve de la pared que ha ejercido tanto de soporte, como de contexto inmediato a las pinturas.

4. Primeros resultados alcanzados

El principal objetivo ha sido generar una copia digital que será estable y perdurable en el tiempo, posibilitando la integración de las evidencias artísticas en cualquier tipo de *Tesaurus* y a su vez, generar entornos de fácil interacción con dicho patrimonio sin ningún riesgo/menoscabo para el mismo (Fig. 5).

Desde el enfoque de la investigación, los productos generados permiten una parametrización en términos de métrica y geometría para con las entidades pictóricas y su contexto próximo (friso, abrigo, bloque), véase Figura 6. Además, posibilita el uso de entornos tipo *visual-*

learning y series estadísticas sobre los conjuntos artísticos, la simulación de fenómenos físicos (Barcia and Maximiano 2015; Maximiano *et al.* 2015), la determinación, la estimación y la simulación de procesos de degradación y daños sobre los motivos artísticos y su contexto próximo. Junto a todo lo anterior, destacamos las opciones que se abren para la puesta en marcha de propuestas de restauración, anastilosis virtual, ya sea parcial o total, sobre casos extremadamente dañados (Grün and Remondino 2004; López 2014).

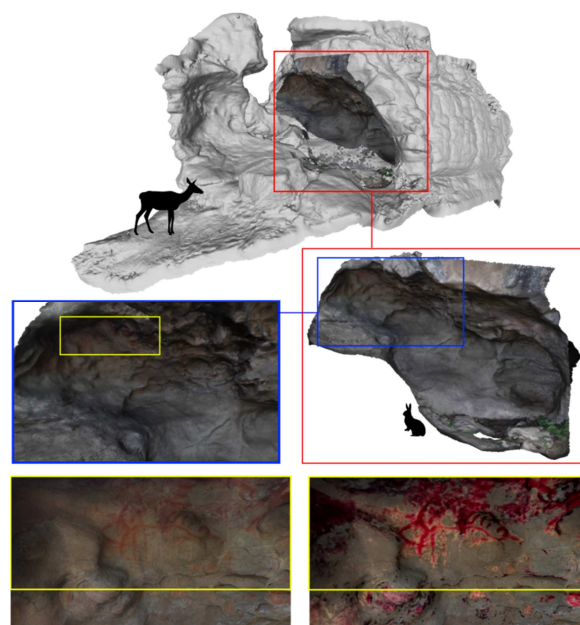


Figura 5: Visualización de las diferentes escalas de los productos 3D generados. Desde el volumen 3D completo, hasta los detalles de las pinturas insertos en su correspondiente 3D (Imagen inferior derecha: filtro de color para detectar presencia de pigmentos no visibles a simple vista).

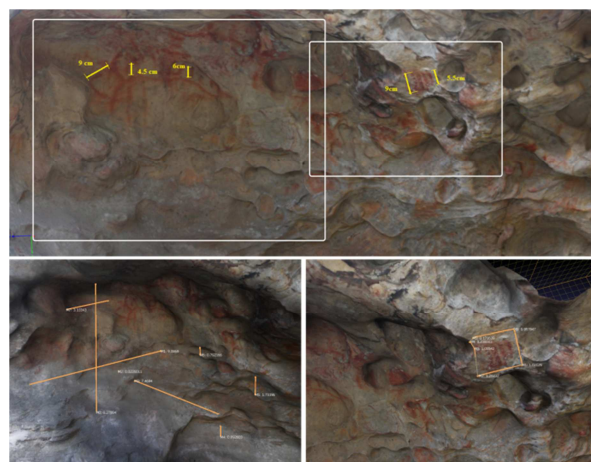


Figura 6: Ejemplos de medidas sobre algunas de las evidencias pictóricas en partes del friso.

Por otra parte, aspectos referidos a la textura y colorimetría tratados desde escenas 3D, ortofoto y algoritmos de descorrelación de longitudes de onda (falso color) han permitido la detección de determinadas evidencias pictóricas que no son perceptible/reconocibles desde las capacidades del ojo

humano. Estos resultados son muy interesantes, ya que permite el desarrollo de herramientas computacionales desde donde se realicen rutinas de diferentes tipos de filtros de falso color sobre paneles con arte, pudiendo contrastar la presencia de motivos pictóricos que no han sido detectados a través de los procedimientos clásicos de inspección ocular sobre dichos paneles (Fig. 7).

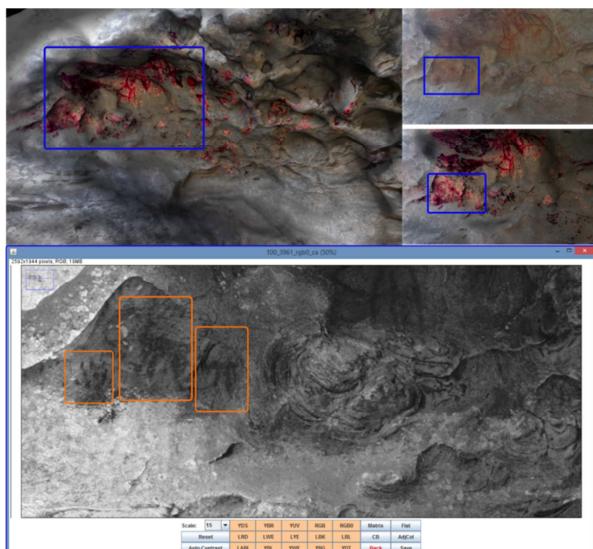


Figura 7: Parte superior de la imagen: Modelo 3D más ortofoto con algoritmo de color en donde se enfatiza los píxeles con color rojo (pigmentos) perteneciente a los motivos representados. En la parte inferior, aplicación sobre foto del algoritmo en ImageJ y Dstrecth con la configuración RGB0 en textura de fondo black para destacar la presencia de dos posibles figuras que podrían representar animales cuadrúpedos y algo que es indeterminado a la derecha de los mismos.

Desde una perspectiva orientada hacia las esferas de la protección y la sensibilización/difusión de este singular patrimonio artístico, los salidas digitales deben contar con una serie de peculiaridades, ya que en este caso, el arte parietal se convierte en un medio para el conocimiento de dinámicas sociales de la Prehistoria para tipos de público diferente al académico (López 2007). Con ello, se pretende aportar una infraestructura digital que permita la creación de narrativas adaptadas a diferentes tipos de colectivos de la sociedad actual, facilitando la interacción con este clúster de arte rupestre. Sin duda alguna, la mejor forma de proteger es conocer, de tal modo que la labor de difusión sobre el *Arte Sureño* lleva implícito un discurso adaptado a las necesidades del receptor (Maximiano y Barcia *en prensa*). Así, disponer de un soporte digital que se ciña a los principios de *la Carta de Sevilla: International Principles Of Virtual Archaeology*

(<http://virtualarchaeology.net/>), que sea flexible y de calidad media-alta, posibilita que las acciones de sensibilización y protección sean más eficientes a través de ciertas propuestas digitales, que mediante la recurrencia a determinados soportes analógicos, los cuales siguen siendo válidos y complementarios a las soluciones digitales. En estos términos, configurar los productos alcanzados con SfM y software libre permite desarrollar contenidos en entornos como Webs inversivas, Realidad Virtual y Realidad Aumentada, contextos ideales y recomendables para que el visitante, en función de sus necesidades, pueda acceder a un discurso comprensible y útil a la hora de entender qué es lo que está viendo (e incluso, lo que ya no existe) y qué implicaciones histórico-culturales conllevan esas evidencias del pasado.

5. Sin ánimo de concluir...

Creemos que con el caso de estudio expuesto, encontramos una convergencia plausible entre el problema y los medios digitales que ofrecen soluciones. La técnica SfM ha permitido la generación de unos productos digitales con suficiente calidad y solvencia que, aun siendo más limitados que los resultantes mediante el uso de otras tecnologías (por ej. láser-escáner), permiten alcanzar los objetivos propuestos y validar la utilidad de poner en marcha un programa de digitalización implementando recursos tecnológicos de tipo low-cost con cámaras digitales no profesionales, y el uso de software libre.

Entendemos que lo principal en una creación digital, es que sea un producto fidedigno a la realidad representada, y lo suficientemente válido que permita seguir desarrollando contenidos, atendiendo a las necesidades concretas del desarrollador y en conexión real con los potenciales usuarios. Es evidente que los productos digitales 3D son sólo copias (necesariamente imperfectas) de la *realidad*, algo que por sí mismo no puede reparar los daños provocados sobre muchos casos del *Arte Sureño* (antrópicos en su mayoría, naturales en menor medida). Ahora bien, contar con estas copias digitales constituye un paso adelante para resolver '*viejos problemas*' desde nuevos enfoques y, quizás también, "democratizar" el acceso a la producción de conocimiento y desarrollar entornos más amigables que permitan un conocimiento más accesible e interactivo de estas singulares expresiones artísticas.

En definitiva, digitalizar no es un fin en sí mismo, sólo un -interesante- medio para alcanzar algunas de las pretensiones que hemos incluido en este trabajo, además de ser un catalizador de procesos en torno a la tarea de investigadores y divulgadores.

References

- ABRAMOFF, M.D., MAGALHAES, P.J. and RAM, S.J., 2004. Image processing with ImageJ. *Biophotonics International*, **11**(7), pp. 36-42.
- AGARWAL, S., FURUKAWA, Y., SNAVELY, N., CURLESS, B., SEITZ, S. M. and SZELISKI, R., 2010. Reconstructing Rome. *Computer*, **43**(6), pp. 40-47.
- BARCIA, C. and MAXIMIANO, A.M., 2015. Interpretar la oscuridad: cuevas, arte rupestre y análisis de luz simulada mediante escenas virtuales. *Virtual Archaeological Review*, **6**(12), pp. 5-18.
- BREUIL, H. and BURKITT, M.C., 1929. *Rock paintings of southern Andalusia: a description of a Neolithic and Copper Age art group*. Oxford, Oxford University Press.

- CALLIERI, M., RAZUGLIA, G., DELLEPIANE, M., CIGNONI, P. and SCOPIGNO, R., 2013. Meshlab as a complete open tool for the integration of photos and colour with high-resolution 3D geometry data. En G. Earl, T. Sly, A. Chrysanthi, P. Murrieta-Flores, C. Papadopoulos, I. Romanowska y D. Wheatley (eds.), *Archaeology in the Digital Era, volume II: e-Papers from the 40thCAA Conference (Southampton, 2012)*. Amsterdam, Amsterdam University Press: pp. 406-416.
- CIGNONI, P., CALLIERI, M., CORSINI, M., DELLEPIANE, M., GANOVELLI, F. and RANZUGLIA, G., 2008. MeshLab: an open-source mesh processing tool. En V. Scarano, R. de Chiara y U. Erra (eds.), *Sixth Eurographics Italian Chapter Conference*: pp. 129-136.
- DÍAZ-ANDREU, M. and LAZARICH, M., 2014. The Sound of Rock Art. The Acoustics of the Rock Art of Southern Andalusia (Spain). *Oxford Journal of Archaeology*, **33**(1), pp. 1-18.
- GÓMAR, A.M.; RUIZ, A. and CARRERAS, A.M., 2011. Tratamiento y calco digital aplicado al estudio de los abrigos de arte rupestre de la provincia de Cádiz. *Almoraima*, **42**, pp. 287-302.
- GRÜN, A. and REMONDINO, F., 2004. Photogrammetric reconstruction of the Great Buddha of Bamiyan, Afghanistan. *The Photogrammetric Record*, **19**(107), pp. 177-199.
- HARMAN, J., 2008. Using decorrelation stretch to enhance rock art images. *Paper presented at America Rock Art Research Association annual meeting (May 28th, 2005)*. Available: <http://www.dstretch.com/AlgorithmDescription.html> [03/05,2017].
- HARMAN, J., 2017. *DStretch: web site for the DStretch plugin to ImageJ, a tool for the digital enhancement of pictographs*. Available: <http://www.dstretch.com/AlgorithmDescription.html> [03/05,2017].
- LAZARICH, M., RAMOS-GIL, A., RUIZ, A., GÓMAR, A.M., TORRES, F. and NARVÁEZ, M., 2015. Bacinete: un escenario de arte rupestre al aire libre. *Varia XII - Serie arqueológica*, **24**, pp. 487-533.
- LÓPEZ, F.J., 2007. La infografía 3D como sistema de documentación y divulgación. In J. Morín (coord.), *Primer simposio Audema: la investigación y difusión arqueopaleontológica en el marco de la iniciativa privada*. Madrid, Auditores de Energía y Medioambiente: pp. 429-444.
- LÓPEZ, E., 2014. Out of the box: exploring the 3D modeling potential of ancient image archives. *Virtual Archaeological Review*, **5**(10), pp. 107-116.
- MARTÍNEZ, F.J., MEDINA, A.J. and SAN NICOLÁS, M., 2013. Aplicación del plugin DStretch para el programa ImageJ al estudio de las manifestaciones pictóricas del abrigo Riquelme (Murcia). *Cuadernos de Arte Rupestre*, **6**, pp.113-127.
- MAXIMIANO, A. M., BARCIA, C., *en prensa* Patrimonio digitalizado para tod@s: Recursos Digitales para el arte rupestre prehistorico del Campo de Gibraltar. En II Jornadas de Historia del Arte Campo de Gibraltar. Instituto de Estudios Campogibraltares. Castellar de la Frontera. Mayo 2017.
- MAXIMIANO, A.M., BARCIA, C., ARIAS, P. and ONTAÑÓN, R., 2015. Luces en la oscuridad: softcomputing y arte rupestre en el sitio magdalenense de la Galería Inferior de La Garma. En A. Maximiano y E. Cerrillo (eds.), *Arqueología y Tecnologías de Información Espacial: una perspectiva ibero-americana*. Oxford, Archaeopress: pp. 50-74.
- PEREIRA, J.M., 2013. Modelado 3D en patrimonio cultural por técnicas de structure from motion. *PH Investigación*, **1**, pp. 77-87.
- QUESADA, E., 2010. Aplicación Dstretch del software Image-J. Avance de resultados en el Arte Rupestre de la Región de Murcia. *Cuadernos de Arte Rupestre*, **5**, pp. 9-27.
- REMONDINO, F., 2014. Photogrammetry: Basic theory. En F. Remondino y S. Campana (eds.), *3D Recording and modelling in archaeological and cultural heritage: theory and best practices*. Oxford, BAR International Series 2598: pp. 63-72.
- SCHNEIDER, C.A.; RASBAND, W.S. and ELICEIRI, K.W., 2012. NIH image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, **9**, pp. 671-675.
- SOLÍS, M., 2009. Restauración - Reconstrucción - Recreación virtual aplicada al conjunto rupestre de Bacinete. *Espacio, Tiempo y Forma (Serie I, Nueva época): Prehistoria y Arqueología*, **2**, pp. 127-134.
- SOLÍS, M., 2015. *La pintura rupestre en el entorno de la Laguna de la Janda: Sierra del Niño (Cádiz)*. Cambio cultural, arte y paisaje. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- TORRES, J.C., ARROYO, G., ROMO, C. and DE HARO, J., 2012. 3D Digitization using Structure from Motion. *CEIG 2012: XXII Spanish Computer Graphics Conference (Jaén, Spain, September 12-14th, 2012)*.
- WU, C., 2011. VisualSFM: A Visual Structure from Motion System. Available: <http://ccwu/vsfm/> [8/15, 2012].
- WU, C., 2013. Towards linear-time incremental structure from motion. *Proceedings of the 2013 International Conference on 3D Vision*: pp. 127-134.

PROCESAMIENTO AUTOMATIZADO DE MODELOS TRIDIMENSIONALES DE ÚLCERAS CUTÁNEAS

AUTOMATIC PROCESSING OF THREE-DIMENSIONAL MODELS OF SKIN ULCERS

David Sánchez-Jiménez^a, Fernando Buchón-Moragues^{a,*}, Jesús Palomar-Vázquez^a, Guillermo Peris-Fajarnés^b

^a Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022, Valencia, España. dasanjimenez@gmail.com; fbuchon@upvnet.upv.es; jpalomav@upvnet.upv.es

^b Centro de Investigación en Tecnologías Gráficas, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022, Valencia, España. gperis@dig.upv.es

Abstract:

Geomatics includes techniques such as photogrammetry, remote sensing and geographic information systems, which provide applicable tools in various areas of biomedicine, for example skin ulcer measurement. In previous projects we developed procedures for acquiring data and measuring skin ulcers using a digital photo camera, a manual scanner and photogrammetry software based on correlation. We have tested our technique in a randomized clinical trial in patients with chronic leg ulcers. In the present project an application system is created with the following objectives: automate the processing of three-dimensional models of cutaneous ulcers and generate documentation that ease the interpretation of the evolution of skin ulcers by medical personnel (including PDF report, AVI animation and XOS augmented reality project). We also created a website prototype that stores the documentation, allowing registered users to upload photographs and consult or modify the database of skin ulcers. A test is performed with 50 cutaneous leg ulcers, in order to debug and improve the application system and the website prototype.

Key words: Skin ulcers, Wounds, 3D Modelling, Geomatics, Photogrammetry

Resumen:

La geomática utiliza técnicas como la fotogrametría, teledetección y sistemas de información geográfica, que proporcionan herramientas aplicables a diversas áreas de la biomedicina como, por ejemplo, la medición de úlceras cutáneas. En proyectos anteriores desarrollamos los procedimientos de toma de datos y medición de las dimensiones de las úlceras mediante cámara fotográfica digital, escáner manual y software fotogramétrico de escaneado basado en correlación. Hemos probado nuestra técnica en un ensayo clínico aleatorizado realizado en pacientes con úlceras crónicas de la pierna. En el presente proyecto se crea un sistema de aplicaciones con los siguientes objetivos: automatizar el procesamiento de los modelos tridimensionales de las úlceras cutáneas; generar una documentación que facilite la interpretación de la evolución de la úlcera cutánea por personal médico (incluyendo informe PDF, animación AVI y proyecto de realidad aumentada XOS). También se crea un prototipo de página web que almacene la documentación, permita subir fotografías y consultar o modificar la base de datos de úlceras cutáneas. Se realiza una prueba con datos de 50 úlceras cutáneas de pierna, para depurar y mejorar el sistema de aplicaciones y el prototipo de página web.

Palabras clave: Úlceras cutáneas, Heridas, Modelización 3D, Geomática, Fotogrametría

1. Introducción: Medición de las úlceras de la piel

1.1. Importancia del problema

Las úlceras de la piel tienen importantes repercusiones desde un punto de vista médico y social: económicas, sobre la salud y calidad de vida de los pacientes. Conllevan un elevado coste económico por su tratamiento, alta prevalencia, evolución crónica y repercusión en bajas laborales. Este problema sanitario afectaba en EEUU a 6'5 millones de personas (> 2% de la población), según datos de 2009, con un coste anual del tratamiento de 25 mil millones de dólares (Sen *et al.*

2009). En España, este coste se estimó en 461 millones de euros anuales, solamente para un tipo de úlceras: las úlceras por presión (Soldevilla *et al.* 2007). Se prevé que la importancia de este problema aumente, tanto en su prevalencia (por la forma de vida actual: sedentarismo, tabaquismo, sobrepeso, diabetes) como en su repercusión económica.

1.2. Necesidad de la medición

La medición de úlceras de la piel comenzó a hacerse en 1 y 2 dimensiones hace más de 20 años, para evaluar su evolución (Kantor and Margolis 1998); forma parte de varias escalas de valoración periódica utilizadas en clínica (Bates-Jensen 2001) y tiene importancia en el

* Corresponding Author: Fernando Buchón-Moragues, fbuchon@upvnet.upv.es

seguimiento evolutivo de los pacientes (Pavlovic *et al.* 2015; Gethin 2006).

Hay buena correlación entre la cicatrización de las úlceras cutáneas y la disminución de variables como superficie, perímetro y profundidad. Se han sugerido variables predictivas de curación de la úlcera: por ejemplo, Flanagan (2003) sugirió que la disminución de un 40% en la superficie de una úlcera en 4 semanas es un buen predictor de cicatrización o curación de ésta (Sheehan *et al.* 2003; Gelfand *et al.* 2002).

Una optimización de las técnicas utilizadas para la valoración objetiva de la evolución de las úlceras de la piel ayudaría también a comparar la eficacia de los distintos tratamientos (Romanelli 2007) y seleccionar los más adecuados, así como predecir el tiempo de curación (Redden *et al.* 1998; Prompers *et al.* 2008).

1.3. Papel de la fotogrametría

La fotogrametría es una técnica sin contacto, muy precisa para medir diversas variables de la úlcera de la piel como el diámetro y profundidad máximos, perímetro, superficie, volumen, etc. (Boersma 2000; Luhmann 2010; Davis *et al.* 2013). El riesgo de infección asociado a la utilización de la fotogrametría es mínimo, pero esta técnica hasta ahora ha sido poco aplicable a la medición de úlceras en investigación o clínica, debido al tiempo, habilidad y coste del equipamiento necesarios para la configuración y puesta a punto del sistema, así como la toma y procesamiento de datos (Shaw and Bell, 2011, Mitchell and Newton 2002, Marjanovic *et al.* 1998, Kecelj-Leskovec 2007). Se han realizado algunos estudios con técnicas fotogramétricas para medir variables tridimensionales como el volumen (Langemo *et al.* 2001; Stockton *et al.* 2015), pero son necesarios nuevos estudios para comprobar su exactitud, optimizar su coste y mejorar la configuración del sistema (Jorgensen *et al.* 2016).

1.4. Estado actual de nuestro sistema

En proyectos anteriores desarrollamos los procedimientos de toma de datos y medición de las dimensiones de las úlceras (índice de rugosidad, coeficiente de circularidad, longitud máxima, perímetro, diámetro, superficie, superficie excavada y volumen) mediante cámara fotográfica, escáner manual y software fotogramétrico de escaneado basado en correlación (Sánchez-Jiménez 2013; Sánchez-Jiménez 2014; Botella *et al.* 2015, Buchón 2015). Hemos probado nuestra técnica en un ensayo clínico aleatorizado realizado en pacientes con úlceras crónicas de la pierna (Martínez *et al.* 2016).

1.5. Desarrollo de nuestro sistema

En continuidad con nuestra línea de investigación, este proyecto intenta dar un paso más, con la automatización del procesamiento de los modelos tridimensionales obtenidos tras la toma de imágenes de úlceras cutáneas.

Con este propósito, se crean tres programas para facilitar la interpretación de la evolución de las úlceras cutáneas durante el seguimiento por el personal sanitario. Se crea también un prototipo de página web para almacenar estas variables y documentos y permitir

una interacción con el personal sanitario. Además, se prueba y depura el funcionamiento de este conjunto de programas y prototipo de página web introduciendo datos reales de 50 úlceras cutáneas de la pierna.

2. Justificación

La realización de este proyecto es necesaria para poner a punto una técnica de medición de variables tridimensionales en úlceras de la piel.

La principal utilidad de este proyecto es crear una herramienta con dos funciones:

- Automatizar el tratamiento y gestión de los datos tridimensionales obtenidos en la toma de fotografías de úlceras de la piel.
- Presentar los resultados y facilitar su interpretación por el personal sanitario.

3. Objetivos

1) Crear un sistema de aplicaciones informáticas para automatizar el procesamiento de los modelos tridimensionales obtenidos tras la toma de imágenes. Se incluye el cálculo de las variables y la generación de documentos informativos con las características de las úlceras cutáneas, utilizando los siguientes programas:

Programa MU (medición de úlceras): genera un informe en formato PDF.

Programa CA3D (creador de animación 3D): genera una animación en formato AVI.

Programa CPRA (creador de proyecto de realidad aumentada): genera una escena de realidad aumentada en formato XOS.

2) Crear un prototipo de página web que aloje una base de datos dinámica con las variables de las úlceras cutáneas, ordenada por paciente y semana, que permita descargar la documentación obtenida con los programas anteriores, así como visualizar y medir los modelos tridimensionales de las úlceras.

3) Probar el funcionamiento del sistema de aplicaciones en conjunto con el prototipo de página web introduciendo datos reales de 50 úlceras cutáneas de pierna.

4. Método y resultados

4.1. Variables de la úlcera

Para calcular las variables de la úlcera cutánea es necesario determinar cuál será la superficie de referencia que delimite el "techo de la úlcera". Definiremos esta superficie no como un plano recto que corta la úlcera desde sus extremos, sino como la superficie curva que mejor se ajusta a la forma que tendría la superficie sana de la pierna, es decir, sin úlcera.

Esto lo hacemos con una interpolación en los contornos de la úlcera, de tal forma que si llevaban una determinada curvatura (la pierna se asemeja a un cilindro) la conserve.

La superficie excavada está determinada por el nicho de la úlcera cutánea, con sus prominencias y excavaciones. Será mayor cuanto más accidentada sea la úlcera.

El índice de rugosidad se calcula como el cociente entre la superficie excavada y la superficie de referencia, véase Ec. (1):

$$\text{Índice de rugosidad} = \frac{\text{Superficie excavada}}{\text{Superficie de referencia}} \quad (1)$$

Valores altos de este índice corresponden a úlceras muy accidentadas, con muchos recovecos e irregularidades.

El coeficiente de circularidad se calcula con la siguiente expresión, véase Ec. (2):

$$\text{Coef. de circularidad} = \frac{4\pi \cdot \text{Superficie de referencia}}{\text{Perímetro}^2} \quad (2)$$

Valores altos de este índice corresponden a úlceras con un contorno simple, similar a una circunferencia.

El volumen es el espacio comprendido entre las superficies de referencia y excavada.

4.2. Programa MU (medición de úlceras)

La utilidad de este programa es automatizar la medición de un conjunto de variables tridimensionales en una úlcera cutánea y generar un informe en formato PDF.

Los datos de entrada para cada úlcera cutánea son los siguientes:

- Fotografía (En formato JPG/PNG).
- Nube de puntos (En formato TXT, estructurado de la siguiente forma: Identificador de punto, coordenada X en mm, coordenada Y en mm, coordenada Z en mm).
- Superficie de referencia (En formato TXT, estructurado de la siguiente forma: Identificador de punto, coordenada X en mm, coordenada Y en mm, coordenada Z en mm).

4.2.1. Descripción técnica

El programa en lenguaje Python, haciendo uso de la librería ArcPy, realiza operaciones propias de un Sistema de Información Geográfica para calcular las variables y crear las representaciones gráficas que se muestran en el informe PDF. Algunas de estas operaciones son:

Partiendo de unas nubes de puntos (X, Y, Z), éstas se triangulan para obtener una malla TIN (Triangulated Irregular Network). Esta malla se transforma en raster. A partir de este raster se obtienen la superficie, superficie excavada y volumen de la úlcera cutánea. Se convierte el raster en polígono, para calcular el perímetro. La longitud máxima se obtiene localizando los vértices del polígono y calculando las distancias entre ellos. El índice de rugosidad y el coeficiente de circularidad se calculan con las expresiones citadas en el apartado "Variables de las úlceras".

4.2.2. Resultado

En la Figura 1 se presenta el informe creado con el programa MU, que muestra las variables de la úlcera cutánea del paciente "5A" en su primera visita.

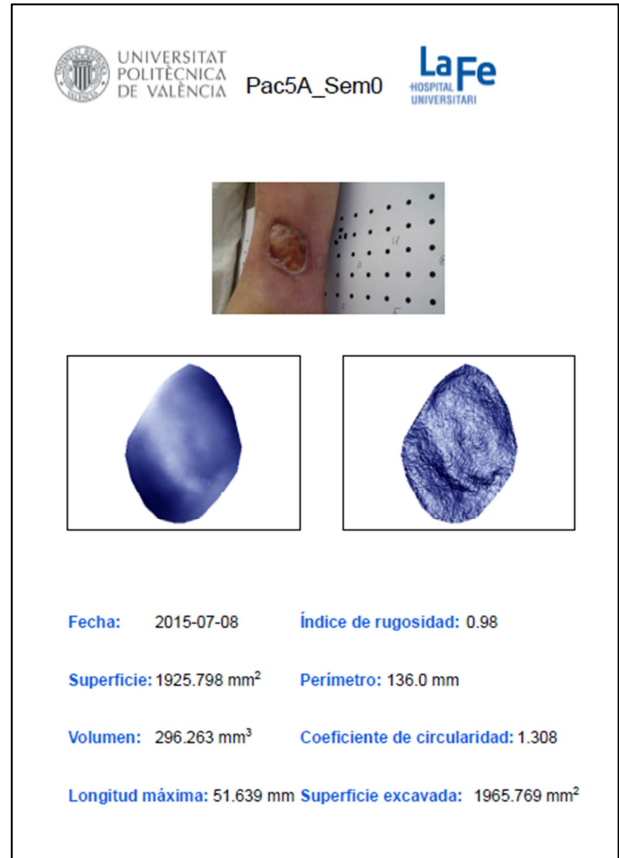


Figura 1: Informe creado con el programa MU.

4.3. Programa CA3D (creador de animación 3D)

La utilidad de este programa es producir un vídeo para visualizar el modelo tridimensional de la úlcera cutánea y mostrar su evolución temporal, junto a un resumen de variables descriptivas que aparecen en el vídeo.

Los datos de entrada para cada úlcera cutánea son los siguientes:

- Nube de puntos trianguladas (En formato OBJ).
- Texturas (En formato JPG/PNG); (opcional).

4.3.1. Descripción técnica

El programa en lenguaje Python, haciendo uso de la librería bpy, genera un código interpretable por Blender™ en base a los parámetros introducidos en su interfaz gráfica. Guarda este código y lo ejecuta como un subproceso de sistema. Genera resultados en formatos AVI y PNG.

4.3.2. Resultado

En la Figura 2 se presenta el primer fotograma de la animación creada con el programa CA3D, que muestra la evolución de la úlcera cutánea del paciente "12" en su primera visita.



Figura 2: Primer fotograma de la animación creada con el programa CA3D.

4.4. Programa CPRA (creador de Proyecto de realidad aumentada)

La utilidad de este programa es representar el modelo tridimensional de la úlcera en un entorno de realidad aumentada.

Los datos de entrada para cada úlcera cutánea son los siguientes:

- Nube de puntos trianguladas (En formato OBJ).
- Texturas (En formato JPG/PNG); (opcional).

4.4.1. Descripción técnica

El programa en lenguaje Python, haciendo uso de la librería bpy, genera un código interpretable por Blender™ en base a los parámetros introducidos en su interfaz gráfica. Guarda este código y lo ejecuta como un subproceso de sistema. Genera resultados en formato BLEND, listos para su exportación a formato XOS. Posteriormente se genera en OpenSpace3D™ el algoritmo que asigna las instrucciones a seguir en la detección de los marcadores, cada uno correspondiente a una visita médica. Así pues, se muestra en un entorno de realidad aumentada el objeto tridimensional de la úlcera y sus variables medidas en dicha visita médica, y se ocultan los demás objetos y variables del resto de visitas médicas.

4.4.2. Resultado

En la Figura 3 se presenta el proyecto de realidad aumentada que muestra la evolución de la úlcera cutánea del paciente "13" en su primera visita.

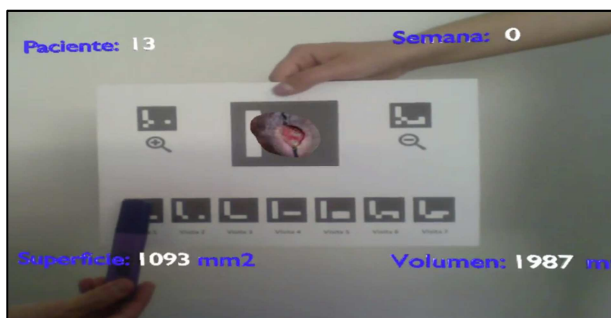


Figura 3: Proyecto de realidad aumentada.

4.5. Prototipo de página web

El prototipo está dividido en secciones: cada una de ellas permite realizar distintas funciones (Fig. 4). El acceso a estas secciones se realiza por peticiones GET y POST que se procesan por una aplicación WSGI (Web Server Gateway Interface), la cual determina la función a realizar: reemplazar código HTML (Hypertext Markup Language), ejecutar JS (JavaScript), consultar las bases de datos alojadas en el servidor por medio de PostgreSQL, etc.

Las funciones del prototipo son:

- Descarga de la documentación obtenida en los programas anteriores y alojada en el servidor (Secciones "Informes PDF", "Evolución en vídeo" y "Realidad Aumentada").
- Carga en el servidor (vía internet) de fotografías de pacientes con úlceras venosas de la pierna (Sección "Enviar Fotografías").
- Consulta de la base de datos alojada en el servidor, con las variables de úlceras de los pacientes (Secciones "Datos de las úlceras" y "Consultar datos de paciente") y los datos de usuarios (Secciones "Iniciar Sesión" y "Mostrar Usuarios").
- Mapa con las entidades relacionadas (Sección "Mapa").
- Visualización de los modelos tridimensionales y medición de sus dimensiones desde el navegador (Sección "3D").

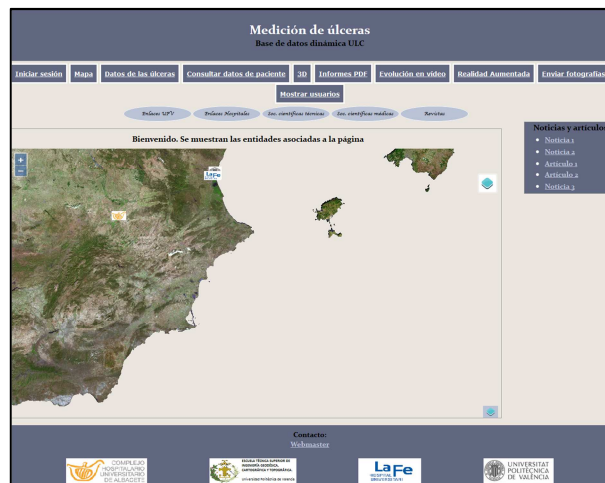


Figura 4: Apariencia del prototipo de página web para el rol de usuario "Administrador".

4.6. Prueba del sistema de aplicaciones y el prototipo de página web

Se obtuvieron resultados de la medición de 50 úlceras cutáneas y su correspondiente documentación utilizando los programas del sistema de aplicaciones. Estos resultados se almacenaron en el prototipo de página web. Con esto se consiguió:

- Depurar los programas y el prototipo de página web.

- Disponer de una primera versión para evaluar su utilidad en clínica.

5. Discusión

Este sistema de aplicaciones (constituido por los 3 programas) y el prototipo de página web podría completar la documentación clínica de la historia médica de un paciente y contribuir a mejorar su asistencia médica. Su utilización dentro de la telemedicina en el seguimiento remoto de pacientes tendría una repercusión económica favorable con dos consecuencias previsibles:

- Disminución del número y frecuencia de visitas físicas.
- Indicar la necesidad de una visita física al médico especialista.

5.1. Aspectos comerciales

5.1.1. Potenciales clientes del sistema de aplicaciones y el prototipo de página web

Estos productos se podrían implementar en centros médicos asistenciales públicos y privados, como hospitales y centros de diagnóstico por la imagen.

Algunas especialidades médicas relacionadas con el tratamiento y la medición de úlceras cutáneas son: Dermatología, Cirugía vascular y Cirugía plástica.

5.2. Flujo de proceso

El flujo de proceso indica las funciones que realiza cada elemento o rol del equipo y se articula de la siguiente forma (Fig. 5):

El paciente acude a la clínica para su asistencia médica. El enfermero toma una serie de fotografías de la úlcera cutánea siguiendo las especificaciones de toma de datos detalladas en los proyectos anteriores (Sánchez-Jiménez 2013; Sánchez-Jiménez 2014; Botella *et al.* 2015; Buchón 2015). El médico valora si estas fotografías deben subirse a la página web, basándose en criterios clínicos. El administrador, tras la recepción de estas fotografías en la página web, las procesa para obtener el modelo tridimensional de la úlcera cutánea. Ejecuta los programas, añade los nuevos registros a la base de datos y actualiza la página web, en la que se incluye la nueva documentación. El médico consulta la página web y recibe información para complementar su diagnóstico, valorar la evolución e individualizar el tratamiento del paciente.

Este flujo de proceso tiene algunas posibles mejoras, que implementaremos en futuras versiones, con la automatización de varias etapas, siendo el flujo de proceso final previsible de la siguiente forma (Fig. 6):

El paciente o un familiar toma sus propias fotografías de la úlcera cutánea, siguiendo las especificaciones de toma de datos detalladas en los proyectos anteriores (Sánchez-Jiménez 2013; Sánchez-Jiménez 2014; Botella *et al.* 2015; Buchón 2015). El médico autoriza la subida de estas fotografías a la página web, basándose en criterios clínicos. Se comprueban automáticamente las fotografías y se realiza una validación técnica de su

calidad, para su inclusión en la base de datos. Se ejecutan automáticamente los programas que generan las medidas que son incluidas en la base de datos. Se actualiza automáticamente la página web incluyendo la nueva documentación generada con los programas. El médico consulta la página web y recibe información para complementar su diagnóstico, valorar la evolución e individualizar el tratamiento del paciente, permitiendo citar al paciente para una consulta física.

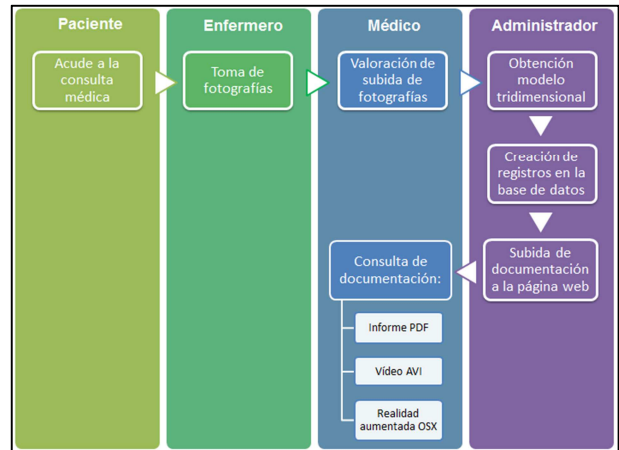


Figura 5: Diagrama de flujo de proceso actual.

Estas modificaciones limitarían el número de elementos o roles involucrados, ciñéndolos a paciente y médico. Esto es conveniente para aumentar la utilidad del producto, una vez comercializado. El administrador sería el responsable del mantenimiento, seguridad y correcto funcionamiento de la página web, pero no manejaría el conjunto de información para cada caso.

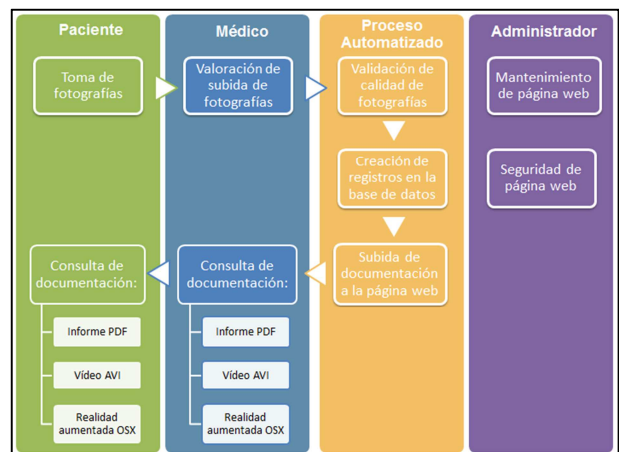


Figura 6: Diagrama de flujo de proceso previsto, después de las modificaciones en versiones futuras.

5.3. Aspectos técnicos

5.3.1. Texturas de las úlceras cutáneas

Los programas CA3D y CPRA permiten mostrar las texturas de los objetos tridimensionales de las úlceras cutáneas. Estas texturas habitualmente serán las radiaciones electromagnéticas reflejadas por el objeto, que corresponden a su color natural. También podría ser útil resaltar otro tipo de información como, por ejemplo, temperatura, la cual podría ayudar en la

delimitación automática del contorno de la úlcera, detección de zonas inflamadas, etc.

5.3.2. Escala y posición

Es necesario tener un control de la escala y posición de los objetos en el programa CA3D, ya que se incluyen en una escena con una cámara de características determinadas en cuanto a posición, rotación, distancia focal, etc.

- Escala: El programa admite cualquier tamaño de objeto. Se escala automáticamente, identificando la dimensión o eje dominante y reduciendo las tres dimensiones o ejes en la misma magnitud.
- Posición: Se admite cualquier posición del objeto. Se identifica automáticamente la posición del centro de masas del objeto y se traslada al origen de la escena.

5.4. Aspectos éticos

5.4.1. Privacidad de la página web

La página web contiene datos confidenciales de pacientes, que no deben ser divulgados. Es necesario que el equipo que desarrolla el software evite su vulnerabilidad y vaya aumentando progresivamente su seguridad. Por este motivo, actualmente el acceso al prototipo de página web está restringido al equipo desarrollador y no se ha subido a la red.

5.4.2. Identificación del paciente

El identificador no podría contener datos de carácter personal, como el DNI del paciente, ya que no se

respetaría la Ley 15/1999 sobre Protección de Datos de Carácter Personal. Se podrían utilizar datos codificados, o bien incluir este sistema de aplicaciones en la historia clínica electrónica, con garantías de seguridad.

6. Conclusiones

- 1) El sistema de aplicaciones creado automatiza el procesamiento de los modelos tridimensionales de las úlceras cutáneas, realizando mediciones de variables en 1, 2 y 3 dimensiones: índice de rugosidad, coeficiente de circularidad, longitud máxima, perímetro, superficie, superficie excavada y volumen.
- 2) La base de datos alojada en el servidor almacena los resultados de las variables de las úlceras cutáneas de los pacientes.
- 3) El sistema de aplicaciones creado genera una documentación que facilita la interpretación de la evolución de la úlcera cutánea por personal médico. Esta documentación incluye informe PDF, animación AVI y proyecto de realidad aumentada XOS.
- 4) El prototipo de página web almacena la documentación, permitiendo subir fotografías al servidor, así como la consulta y modificación de la base de datos, utilizando internet.
- 5) La prueba realizada, con datos de 50 úlceras cutáneas de pierna, ha servido para depurar y mejorar el sistema de aplicaciones y el prototipo de página web.
- 6) Se han detectado algunas limitaciones y posibles mejoras: respecto a la seguridad de la página web, automatización de tareas en el flujo de proceso y privacidad de datos personales, que han de implementarse antes del lanzamiento al mercado de las aplicaciones y la página web.

References

- BATES-JENSEN, B., 2001. Tools for wound healing. Available: <https://www.medlineuniversity.com/DesktopModules/Documents/ViewDocument.aspx?AddToLog=1&DocumentID=866> [4/4, 2017].
- BOERSMA, S.M., VAN DEN HEUVEL, F.A., COHEN, A.F. and SCHOLTENS, R.E., 2000. Photogrammetric wound measurement with a three camera vision system. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **33**(B5), pp. 84–91.
- BOTELLA, R., PALOMAR, J.M., ESCUTIA, M.B., BUCHÓN, F.F., SÁNCHEZ-JIMÉNEZ, D., GARCÍA, A., ESCARIO, E. and MARTÍNEZ, M.L., 2015. Modelado y medición de úlceras de la piel por técnicas fotogramétricas de objeto cercano (MEDULC). Proyecto coordinado UPV – La Fe.
- BUCHÓN, F.F., 2015. Sistemas fotogramétricos submilimétricos de adquisición de datos tridimensionales aplicados a la dermatología. Director: PALOMAR, J.M., Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia.
- DAVIS, A.J., NISHIMURA, J., SETON, J., GOODMAN, B.L., HO, C.H. and BOGIE, K.M., 2013. Repeatability and clinical utility in stereophotogrammetric measurements of wounds. *Journal of Wound Care*, **22**, pp. 90–2, 4–7.
- FLANAGAN, M., 2003. Wound measurement: can it help us to monitor progression to healing?. *Journal of Wound Care*, **12**(5), pp. 189-194.
- GELFAND, J.M., HOFFSTAD, O. and MARGOLIS, D.J., 2002. Surrogate endpoints for the treatment of venous leg ulcers. *Journal of Investigative Dermatology*, **119**(6), pp. 1420–1425.
- GETHIN, G., 2006. The importance of continuous wound measuring. *Wounds*, **2**(2), pp. 60-69.
- JORGENSEN, L.B., SORENSEN, J.A., JEMEC, G.B.E and YDERSTRAEDE, K.B., 2016. Methods to assess area and volumen of rounds – a systematic review. *International Wound Journal*, **13**(4), pp. 540-553.
- KANTOR, J. and MARGOLIS, D.J., 1998. Efficacy and prognostic value of simple wound measurements. *Archives of Dermatology*, **134**, pp. 1571-1574.

- KECELJ-LESKOVEC, N., JEZERSEK, M., MOZINA, J., PAVLOVIC, MD. and LUNDER, T., 2007. Measurements of venous leg ulcers with a laser-based three-dimensional method: comparison to computer planimetry with photography. *Wound Repair and Regeneration*, **15**, pp. 767-771.
- LANGEMO, D.K., MELLAND, H., OLSON, B., HANSON, D., HUNTER, S., HENLY, S.J. and THOMPSON, P., 2001. Comparison of 2 wound volume measurement methods. *Advances in Skin & Wound Care*, **14**, pp. 190-196.
- LUHMANN, T., 2010. Close range photogrammetry for industrial applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **65**, pp. 558-569.
- MARJANOVIC, D., DUGDALE, R.E. and VOWDEN, P., 1998. Measurement of the volume of a leg ulcer using a laser scanner. *Physiological Measurement*, **19**, pp. 535-543.
- MARTÍNEZ, M.L., ESCARIO, E., POBLET, E., SÁNCHEZ-JIMÉNEZ, D., BUCHÓN, F.F., IZETA, A. and JIMÉNEZ, F., 2016. Hair follicle-containing punch grafts accelerate chronic ulcer healing: A randomized controlled trial. *Journal of the American Academy of Dermatology*, **75**(5), pp. 1007-1014.
- MITCHELL, H.L. and NEWTON, I., 2002. Medical photogrammetric measurement: overview and prospects. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **56**, pp. 286-294.
- PAVLOVICIC, U., JANEZ, D., JANEZ, M. and JEZERSEK, M., 2015. Wound perimeter, area and volume measurement based on laser 3D and color acquisition. *BioMedical Engineering OnLine*.
- PROMPERS, L., SCHAPER, N., APELGVIST, J., EDMONDS, M., JUDE, E., MAURICIO, D., UCCIOLI, L., URBANCIC, V., BAKKER, K., HOLSTEIN, P., JIRKOVSKA, A., PIAGGESI, A., RAGNARSON-TENNVALL, G., REIKE, H., SPRAUL, M., VAN ACKER, K., VAN BAAL, J., VAN MERODE, F., FERREIRA, I. and HUIJBERTS, M., 2008. Prediction of outcome in individuals with diabetic foot ulcers: focus on the differences between individuals with and without peripheral arterial disease. The EURODIALE Study. *Diabetologia*, **51**, pp. 747-755.
- REDDEN, R.A., BLUM, B., KILPADI, D. and FELDMAN, D., 1998. Quantitative assessment of wound healing rate, wound repair and regeneration. *Wound Repair and Regeneration*, **6**(3), pp. 246.
- ROMANELLI, M., DINI, V., BIANCHI, T. and ROMANELLI, P., 2007. Wound assessment by 3-dimensional laser scanning. *Archives of Dermatology*, **143**(10), pp. 1333-1334.
- SÁNCHEZ-JIMÉNEZ, D., 2013. Aplicaciones médicas de la fotogrametría a la medición de úlceras de la piel. Tutor: BUCHÓN, F.F., Proyecto Final de Carrera, Universidad Politécnica de Valencia.
- SÁNCHEZ-JIMÉNEZ, D., 2014. Modelado de úlceras de la piel mediante fotogrametría: Escaneado basado en imágenes. Tutor: BUCHÓN, F.F., Proyecto Final de Grado, Universidad Politécnica de Valencia.
- SEN, C.K., GORDILLO, G.M., ROY, S., KIRSNER, R., LAMBERT, L., HUNT, TK., GOTTRUP, F., GURTNER, G.C. and LONGAKER, M.T., 2009. Human Skin Wounds: A Major and Snowballing Threat to Public Health and the Economy. *Wound Repair and Regeneration*, **17**(6), pp. 763-771.
- SHAW, J. and BELL, P.M., 2011. Wound Measurement in Diabetic Foot Ulceration. Available: <https://www.intechopen.com/books/global-perspective-on-diabetic-foot-ulcerations/wound-measurement-in-diabetic-foot-ulceration> [4/4, 2017].
- SHEEHAN, P., JONES, P., CASELLI, A., GIURINI, J.M. and VEVES, A., 2003. Percent change in wound area of diabetic foot ulcers over a 4-week period is a robust predictor of complete healing in a 12 week prospective trial. *Diabetes Care*, **26**(6), pp. 1879-1882.
- SOLDEVILLA, J.J., TORRA I BOU, J., POSNETT, J., VERDÚ, J., SAN MIGUEL, L. and MAYAN, J.M., 2007. Una aproximación al impacto del coste económico del tratamiento de las úlceras por presión en España. *Gerokomos*, **18**(4), pp. 43-52.
- STOCKTON, K.A., MCMILLAN, C.M., STOREY, K.J., DAVID, M.C. and KIMBLE, R.M., 2015. 3D photography is as accurate as digital planimetry tracing in determining burn wound area. *Burns*, **41**, pp. 80-84.

DETERMINACIÓN DE TRAYECTORIAS DE BLOQUES ROCOSOS EN ENSAYOS MEDIANTE VIDEOGRAMETRÍA

DETERMINATION OF ROCK BLOCK TRAJECTORIES IN DROP TESTS USING VIDEOGRAMMETRY

Albert Prades^{a,*}, Gerard Matas^b, Amparo Núñez-Andrés^a, Felipe Buill^a, Nieves Lantada^b, Jordi Corominas^b

^a Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Politécnica Superior de Edificación de Cataluña, Universitat Politècnica de Catalunya, Avda. Dr. Marañón 44-50, 08028, Barcelona. alberto.prades.i@upc.edu

^b Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, C/ Jordi Girona 1-3, 08034, Barcelona.

Abstract:

Determining the trajectory of a block that falls down on a slope is not straightforward due to the high number of variables involved. Because of this, the appropriate understanding of how these variables may affect the trajectories is required.

In this work, we estimate some magnitudes that affect the trajectories of the blocks such as the coefficient of restitution and the energy thresholds for fragmentation of the blocks among others. We have chosen the controlled scenario of a quarry in which targets and high speed video cameras were arranged to capture images of the blocks falling from the top of a slope. The position of the blocks over time has been measured from video frames applying photogrammetric methods. From here, the velocities and the accelerations have been determined, and with the estimated mass of each block, we have calculated the energy balance.

Key words: Geomatics, Photogrammetry, Videogrammetry, 3D Models, Rock falls.

Resumen:

La trayectoria de un bloque que cae por un talud no es fácil de determinar porque influyen muchas variables difíciles de cuantificar. Ello requiere del conocimiento de cómo estas variables afectan a las trayectorias.

En este trabajo se estiman algunas magnitudes que afectan la trayectoria de los bloques como son los coeficientes de restitución y los límites de energía para generar la fragmentación del bloque, entre otros. Para ello se ha escogido el entorno controlado de una cantera, en el que se han dispuesto dianas y cámaras de vídeo de alta velocidad, para capturar imágenes de las caídas de bloques lanzados desde lo alto de un talud. Hemos medido la posición del bloque respecto del tiempo a partir de los fotogramas de vídeo obtenidos, aplicando métodos fotogramétricos. A partir de aquí se determinan las velocidades y las aceleraciones y, con la estimación de la masa de cada bloque, hemos calculado los balances de energía.

Palabras clave: Geomática, Fotogrametría, Videogrametría, Modelos 3D, Desprendimientos rocosos.

1. Introducción

Se entiende por desprendimientos rocosos las masas de roca que, por algún motivo, se separan de una pared y se propagan por la pendiente en caída libre, rebotando, rodando y fragmentándose. Los desprendimientos rocosos pueden ocurrir en cualquier instante indeterminado y en cualquier lugar del territorio susceptible de este tipo de sucesos, especialmente en zonas montañosas de topografía accidentada o en lugares próximos a acantilados. También se caracterizan por ser fenómenos extraordinariamente rápidos de los cuales cuando se producen, no hay posibilidad de escapar. En estas condiciones, el riesgo que se produzcan víctimas o desperfectos en edificios e infraestructuras es altamente probable y la única solución posible es la prevención tomando las medidas

de protección oportunas (Corominas and Mavrouli 2011; Corominas *et al.* 2013).

La prevención es posible si, en las zonas de peligrosidad, se tiene conocimiento a priori de los volúmenes movilizables, de las posibles trayectorias que los bloques pudieran trazar durante su caída y de las energías transportadas por dichos bloques o sus fragmentos en el caso de que se produzcan roturas.

Durante los últimos cuatro años nuestro grupo de investigación ha desarrollado modelos que simulan desprendimientos rocosos. Nuestro objetivo es la prevención de este tipo de sucesos en las zonas de riesgo, proporcionando criterios para el diseño de sistemas de protección. Información adicional sobre nuestros trabajos de investigación se puede encontrar en: <https://rockmodels.upc.edu/es>

* Corresponding Author: Albert Prades, alberto.prades.i@upc.edu

Los modelos de fragmentación y propagación de los desprendimientos requieren conocer el comportamiento de un bloque rocoso en su caída por una ladera. Con este propósito, hemos realizado diversos ensayos de caída controlada de bloques de distintos tamaños y características. Su trayectoria de caída se ha registrado mediante cámaras de vídeo de alta velocidad. El interés lo centramos en la extracción de datos fundamentales que contesten preguntas sobre la propagación de un bloque: ¿con qué frecuencia se da la fragmentación?, ¿existen límites de energía que garanticen que un bloque se va a fragmentar?, ¿qué valores medios tienen los coeficientes de restitución en un sustrato determinado?, ¿merece la pena incluir la energía de rotación de los bloques en nuestros modelos o puede ser menospreciada?, etc.

Se considera que desde el momento en que se ha producido la rotura de la pared rocosa, la propagación del desprendimiento está condicionada por las dimensiones de la masa separada, la geometría de la vertiente, las propiedades elásticas del terreno y la presencia de obstáculos. El análisis de la propagación de los desprendimientos es fundamental para cuantificar el riesgo (Volkwein *et al.* 2011) porque define las trayectorias futuras de los bloques rocosos, la altura de los rebotes que se puedan producir, las velocidades y los puntos de impacto. El conocimiento preciso de estos parámetros permitirá determinar la probabilidad de impacto sobre los elementos expuestos, su vulnerabilidad y el diseño de los elementos de protección que se desee instalar.

La capacidad de destrucción de un desprendimiento viene dada por la energía cinética del bloque. En un desprendimiento, los bloques se propagan con distintas velocidades y, por lo tanto, es necesario ver la intensidad del impacto como un parámetro espacialmente distribuido (Fig. 1).

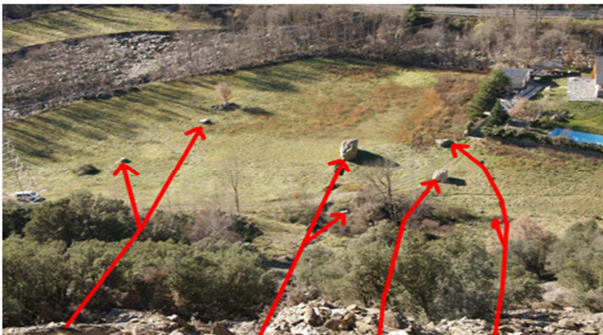


Figura 1: Desprendimiento rocoso en el municipio de Escaló (Lleida). En rojo se muestran las trayectorias seguidas por cada bloque.

Hay grupos de trabajo que están implementando modelos numéricos, tanto bidimensionales como tridimensionales, con los que pretenden calcular precisamente la distribución de las energías de impacto para un hipotético desprendimiento. Así tenemos los programas: ROCKFALL (Stevens 1998), el Colorado Rockfall Simulation Program (CRSP) (Jones *et al.* 2000), HY-STONE (Crosta and Agliardi 2003), Rockyfor 3D (Dorren *et al.* 2010) o el que se está desarrollando actualmente en nuestro grupo de investigación, llamado RockGIS (Matas *et al.* 2017a; Matas *et al.* 2017b). Estos modelos permiten generar mapas temáticos donde se

muestra las trayectorias más probables, las alturas de rebote y la distribución de energías de impacto para cada unidad espacial o celda. La información recogida permite, en un paso posterior, la determinación de la probabilidad de impacto contra los elementos expuestos y la cuantía de los daños esperables en cada caso. Estos mapas son ayudas valiosas para el diseño de los sistemas de protección (barreras dinámicas, terraplenes de protección, etc.), para establecer cuáles son los requisitos mínimos que deben cumplir y cuál es la mejor situación para instalarlos.

En su publicación, Li and Lan (2015) hacen una revisión de las incertidumbres de los modelos de simulación de trayectorias de bloques y remarcan que, al menos hasta entonces, el único modelo que incluye la fragmentación es el programa HY-STONE. En el modelo de desprendimientos que actualmente desarrolla nuestro grupo se hace hincapié en la importancia de considerar la fractura del bloque que está cayendo. Sabemos que el mecanismo de fragmentación de una masa rocosa no es trivial (Zang *et al.* 2000; Chau *et al.* 2002) y que son diversos los parámetros que afectan la fragmentación de un bloque (Wang and Tonon 2011): la presencia de discontinuidades, incluyendo la persistencia y la orientación, la energía del impacto, la rigidez del terreno y el ángulo de incidencia del impacto afectan el modo de disgregación en fragmentos. A su vez e independientemente, cada fragmento seguirá cayendo, rodando y probablemente fragmentándose de nuevo.

Giacomini *et al.* (2009; 2012) hicieron ensayos de caída de bloques en una cantera pero no pudieron definir claramente el umbral de energía de impacto que determinara la fragmentación de un bloque. Se han probado, también, modelos numéricos de elementos discretos para modelizar la fragmentación y los resultados muestran que la fragmentación condiciona la extensión del depósito de bloques (Salciarini *et al.* 2009; Wang and Tonon 2011).

A pesar de los esfuerzos que se han hecho hasta la fecha, la modelización física del proceso de fragmentación aún está lejos de estar resuelta. Por este motivo, Matas *et al.* (2017) han desarrollado un programa de simulación de trayectorias de bloques que incorpora un módulo de fractura de base estocástica, para determinar si un bloque se fragmenta o no en el momento del impacto. La regla para decidir si un bloque se rompe debe ser compatible con las observaciones empíricas de las caídas de bloques hechas en ensayos en las canteras Foj (campana 2015) y La Ponderosa (campana 2016), auspiciadas por el proyecto Rockrisk (Corominas *et al.* 2017).

Es fundamental también considerar la transmisión de la energía del bloque inicial a los fragmentos. En nuestro modelo, al producirse un impacto, parte de la energía cinética es disipada por la deformación del suelo y parte por la deformación o fragmentación del bloque. Una parte de esta energía se la lleva el bloque que rebota o los fragmentos (si el bloque se rompe) dispersados. En el momento del impacto puede ocurrir que una parte de la energía cinética inicial pase a energía de rotación de los bloques. Una manera empírica para establecer los valores de los parámetros de restitución es estudiar en detalle el impacto de un bloque real.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo consiste en analizar la caída de un bloque en un entorno controlado. Mediante métodos fotogramétricos se pretende medir de manera indirecta y precisa las posiciones, velocidades y aceleraciones del bloque a lo largo de su trayectoria. Con la estimación de la masa, asumiendo una densidad conocida, se calculan las energías involucradas en los instantes previos y posteriores a los impactos y a partir de aquí se estima la energía disipada durante el impacto. Consideraremos que la energía disipada se reparte entre la deformación del terreno que soporta el impacto y la deformación del propio bloque.

También nos proponemos medir la velocidad de rotación del bloque y cómo varía a causa de los sucesivos impactos contra la superficie del talud. Se analiza la transferencia de energía rotacional, que no es tenida en cuenta en la mayoría de modelos, y estudiamos si merece la pena incorporarla en el análisis de propagación. Algunas trayectorias de fragmentos de pequeño tamaño, observadas en las imágenes de los vídeos, nos hacen pensar que la respuesta es afirmativa. Creemos que, en algunos casos, un bloque que impacta contra el talud puede aumentar considerablemente la velocidad de rotación. Si en esas condiciones se desprende un pequeño fragmento del bloque en el instante adecuado, podría adquirir una velocidad ascendente suficiente para sobrepasar cualquier obra de defensa (por ejemplo, las barreras de seguridad instaladas en ese punto).

Finalmente, en el caso de que se produzca la fragmentación del bloque realizamos el seguimiento de, al menos, los fragmentos más grandes o de aquellos que, aún siendo pequeños, pudieran tener interés, por ejemplo, porque hayan sido eyectados a gran velocidad. La medida precisa de la posición de los fragmentos dará pistas tales como la distribución de sus velocidades después del rebote y se podrá determinar si los fragmentos quedan confinados dentro de un cono de eyección. En la medida que se estimen las masas de los fragmentos se podría estudiar el balance de energías en el proceso de impacto con fragmentación.

3. Campaña de campo

Durante los días 17 y 18 de junio de 2015 se realizaron dos ensayos de caída de bloques a escala real en la cantera Foj situada en Vallirana (Barcelona). La altura total, teniendo en cuenta la altura de la maquinaria empleada para lanzar los bloques, va desde los 16.5 m hasta los 27.5 m. Se lanzaron un total de 56 bloques con volúmenes comprendidos entre 0.2 y 4.8 m³ (Gili *et al.* 2016). Antes de empezar el ensayo se hizo una cobertura fotográfica alrededor de cada bloque de manera que se pudiera, posteriormente, construir un modelo tridimensional detallado para cada uno de ellos. Paralelamente, en las inmediaciones de la zona se instalaron 12 dianas fijas que hacían las veces de marco sobre el que referir todas las medidas de posición. Las coordenadas locales de los centros de las dianas se midieron cuidadosamente dos o tres veces, a lo largo del tiempo que duraron los ensayos, con una estación total Leica TS06. El levantamiento estaba apoyado por dos receptores GPS Leica serie 530 que nos permitieron pasar las coordenadas locales a sus correspondientes

proyecciones en UTM 31N (ETRS89) y cota ortométrica (modelo de geoida EGM08D595), que es el sistema de coordenadas oficial.

Los ensayos fueron grabados con tres cámaras Sony NEX-FS700R de alta velocidad y alta definición situadas estratégicamente para que nos permitiera triangular en una fase posterior. Las dianas se usaron como puntos de apoyo para el bloque fotogramétrico formado por las tres imágenes obtenidas por las cámaras de vídeo.

Por otra parte, se hicieron tomas de vídeo convencional de cada evento con una cámara GoPro Hero 4 a título de documentación del experimento. Y una toma fotográfica de la berma con una cámara Nikon 5300 con objetivo de 18 mm de distancia focal a una resolución de 6000x4000 píxeles donde se hizo el ensayo, que nos permitió hacer un levantamiento fotogramétrico del que se obtuvo un modelo tridimensional de la zona.

4. Procesamiento de las imágenes de vídeo

El levantamiento topográfico de las dianas nos da el marco de referencia espacial y la base de tiempo de las cámaras de vídeo (1/400 s) nos da el marco temporal. Este montaje nos permite medir las posiciones de un objeto móvil respecto del tiempo y, por lo tanto, su velocidad y aceleración.

4.1. Sincronía entre las tomas de un bloque

En el mercado de instrumentación fotográfica se pueden encontrar artilugios de distinta índole para disparar dos o más cámaras simultáneamente pero, en general, su alcance está restringido a unas distancias de unos pocos metros. En nuestro caso, las cámaras de vídeo están separadas por unos 50 o 60 m entre sí y, en consecuencia, fuera del alcance del disparador. Para evitar complicaciones y encarecer el circuito de disparo se optó por hacer uso de un flash visible por las tres cámaras que, activado en algunos instantes oportunos (al principio, hacia la mitad y al final del lanzamiento), servirían de señal de sincronía.

En el programa que estamos desarrollando hemos añadido un módulo que busca los destellos del flash entre los fotogramas de cada vídeo. Para cada señal que encuentra (suelen ser 2 o 3) deja un registro del fotograma donde ha sucedido el destello. Al acabar el proceso de detección se tienen dos o tres marcas de sincronía para cada toma. A partir de aquí, el programa permite al usuario asignar manualmente las correspondencias de los destellos entre vídeos. Una vez se haya acabado este proceso se dispondrá de las tres tomas de vídeos sincronizadas.

Uno de los problemas que hemos detectado es que la velocidad de obturación de las cámaras de vídeo es tan rápida que, en algunos casos, el destello de luz se produce entre dos fotogramas consecutivos y no queda registrado. En estos casos no queda más remedio que encontrar la sincronía a mano; por ejemplo, observando la zona más baja de la trayectoria del bloque, donde su velocidad es máxima, y decidir a criterio del observador el instante del impacto. Es decir, registramos el fotograma anterior al del impacto como marca de sincronía. Por fortuna, del centenar de bloques lanzados sólo ha ocurrido en unos pocos casos y el inconveniente

principal es que hay que dedicar un poco más de tiempo en encontrar la sincronía entre los vídeos.

4.2. Extracción de la posición de un bloque por fotogrametría

El paso siguiente consiste en relacionar las coordenadas imagen de las dianas medidas sobre cada fotograma, a través de las ecuaciones de proyección central, con las correspondientes coordenadas terreno (Hartley and Zisserman 2008). Con el número suficiente de puntos de los que se han medido las coordenadas imagen y las coordenadas terreno se puede estimar la posición del centro de proyección y la orientación que tenía la cámara en el momento que se tomó aquel fotograma. Este proceso es conocido como orientación externa y representa la reconstrucción de la posición en el espacio del haz de rayos de luz que generaron la imagen.

Una vez se dispone de la orientación externa de las tres cámaras se puede, para cualquier objeto medido sobre, al menos, dos imágenes, por intersección de haces de luz, las correspondientes coordenadas terreno. Nuestro objeto de interés es el bloque que cae por la pendiente, como se muestra en la Figura 2.



Figura 2: Una muestra de nuestro programa en el que vemos la medida simultánea de un punto sobre el bloque desde tres puntos de vista distintos.

Se puede ver que la iluminación, el contraste, las sombras, la baja resolución espacial y la forma no geométrica del objeto hacen difícil encontrar puntos homólogos de calidad entre los fotogramas. Además, sólo se puede medir sobre la superficie del bloque y no se sabe *a priori* donde queda proyectado el centro de masas, que sería el verdadero punto de interés a medir.

4.3. Modelo de los bloques

Durante la campaña de campo se tomó un juego de fotografías alrededor de cada bloque antes de lanzarlos, lo que permitió hacer un modelo tridimensional de cada uno de ellos con la ayuda del programa comercial Agisoft PhotoScan. Hemos desarrollado un módulo en nuestro programa que, partiendo del modelo del bloque, calcula la posición del centro de masas y lo muestra proyectado sobre la superficie del modelo. Nuestra idea es que, por comparación entre el modelo y las respectivas imágenes de vídeo, se sabe en qué punto del bloque se ha de capturar la coordenada imagen apropiada. En la Figura 3 se muestran algunos ejemplos en los que se ha modificado el valor de la transparencia del modelo de modo que puede verse en el interior el centro de masas y los ejes principales del bloque.

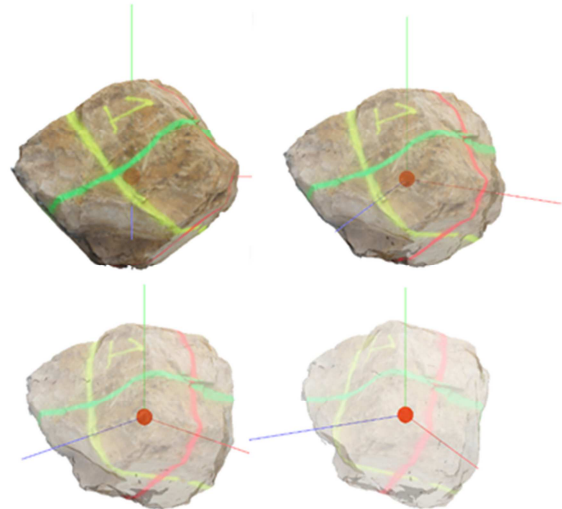


Figura 3: Una muestra de nuestro programa en el que vemos la medida simultánea de un punto sobre el bloque desde cuatro puntos de vista distintos. El programa permite ajustar la transparencia del bloque y permite ver, en el interior, el centro de masas y los ejes principales.

Los bloques lanzados en este estudio en particular son graníticos con una densidad media de 2700 kg/m^3 . El modelo a escala de cada bloque nos permite hacer el cálculo del volumen y con la densidad propuesta se obtiene la masa.

Como se ha dicho en el apartado 2 está previsto que en este trabajo se haga el estudio del efecto de la energía de rotación, por lo tanto, hace falta calcular previamente el tensor de inercia de cada bloque que viene dado por la expresión, Ec. (1):

$$I = \int_V r^2 dm \quad (1)$$

El cálculo del tensor de inercia depende del sistema respecto del que están referidos los puntos de la nube del bloque. Este sistema de referencia es arbitrario y lo define el levantamiento fotogramétrico de cada bloque; a los que sólo se han dotado de escala. Así pues, el paso siguiente es calcular el centro de masas del bloque y situar el origen del sistema de referencia sobre él. Posteriormente, se diagonaliza la matriz del tensor de inercia con lo que quedan determinados los tres ejes principales que servirán, a partir de aquí, de sistema de referencia local para cada bloque. En nuestro caso, para calcular los valores y vectores propios hemos usado el método de Jacobi que implementa las librerías de Numerical Recipes for C++ (Press *et al.* 2007).

En el programa que estamos desarrollando hemos incorporado un método para calcular el tensor de inercia de un sólido a partir de la nube de puntos de su superficie (Blow and Binstock 2004), que evita la integración numérica directa sobre el volumen. El método consiste en subdividir el volumen en tetraedros, que se forman uniendo cada triángulo del modelo con un punto arbitrario (habitualmente el centro de masas). Posteriormente, se calcula iterativamente la posición del centro de masas y el tensor de inercia de cada tetraedro y se van sumando sucesivamente de forma adecuada.

4.4. Extracción de parámetros cinemáticos y dinámicos

Una vez establecido el método para obtener las coordenadas terreno del bloque, como sabemos que el intervalo de tiempo entre dos fotogramas consecutivos es de 2.5 ms, podremos calcular las velocidades a lo largo de la trayectoria. A estas velocidades de muestreo, incluso en los tramos más rápidos de la trayectoria, somos capaces de parar el bloque y decidir con precisión el instante anterior y posterior de un impacto. Con esta información seremos capaces de medir las velocidades de entrada y de salida y, a partir de aquí, podremos estimar los coeficientes de restitución para el punto de impacto (Asteriou *et. al.* 2012). Por otra parte, disponemos de las masas de los bloques y, en consecuencia, calculamos las energías cinéticas antes y después de los impactos y sabemos qué parte de la energía es disipada $E_B + E_T$ durante el impacto (E_B se refiere a la deformación del bloque y E_T a la del terreno).

De la misma manera se puede medir la velocidad de rotación del bloque y, por comparación entre los fotogramas instantes antes y después del impacto, podremos medir los cambios que se produzcan en cada interacción con la vertiente e incorporar la energía de rotación del bloque en el balance de energías del sistema.

En la Figura 4 se muestra el balance de energía donde E_i se refiere a la energía de impacto como la suma de la energía cinética y energía de rotación. Con E_r notamos la energía de rebote que, a su vez, será la suma de las energías cinética y de rotación después del impacto. Cuando el impacto se produce con fragmentación el cálculo se hace más complicado puesto que no disponemos de los modelos 3D de los fragmentos. Por lo tanto, quedaría por hacer una estimación aproximada de sus masas o bien hacer una reconstrucción tridimensional a partir de las imágenes de los tres vídeos. Esta última opción es complicada porque la resolución es demasiado baja y dependemos de cómo giran los fragmentos en el espacio para determinar su forma.

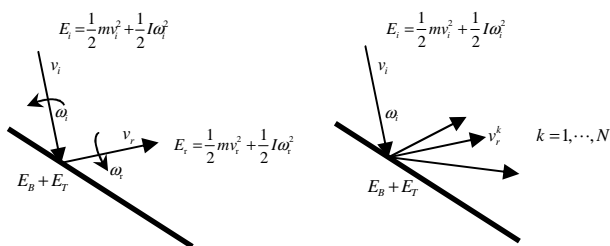


Figura 4: Intercambio de energías en los casos en que no se produzca fragmentación (izquierda) y en los que sí se produce (derecha). En este último, sólo si se pudiera estimar la masa de los fragmentos seríamos capaces de calcular el balance energético.

Por otra parte, podemos estimar cuales son los coeficientes de restitución que dependen de las velocidades que acabamos de medir. En este caso hemos de descomponer las componentes normal y tangencial, R_n y R_t , respectivamente, según el ángulo de incidencia respecto de la normal local de la superficie en este punto. Las expresiones utilizadas con más frecuencia (en la literatura se pueden encontrar otras

formas que incluyen, por ejemplo, las velocidades al cuadrado) son, Ec. (2):

$$R_n = \frac{v_{rn}}{v_{in}}, \quad R_t = \frac{v_{rt}}{v_{it}} \quad (2)$$

donde v_{rn} es la velocidad de entrada normal, v_{in} es la velocidad de rebote normal, v_{it} es la velocidad de entrada tangencial y, por último, v_{rt} es la velocidad de rebote tangencial.

En el momento de escribir este texto ya se han procesado los bloques de forma preliminar. Falta refinar algunos de los procesos para mejorar la precisión en las medidas, pero aún así se muestran algunos de los primeros resultados.

En la Figuras 5 y 6 se muestran las gráficas de las componentes (Easting v_x , Northing v_y , y cota ortométrica v_z) de la velocidad respecto del tiempo. Se puede apreciar en ellas los cambios de velocidad que se producen en los momentos en los que el bloque interacciona con la vertiente. En la gráfica inferior, la de la velocidad v_z , se aprecia que, aproximadamente, en el instante $t = 2.8$ s se produce un cambio muy brusco de velocidad que corresponde al instante en que el bloque choca contra el suelo. A partir de ese momento se alternan velocidades positivas, de las caídas, y velocidades negativas, de los rebotes hasta que, finalmente, el bloque se para. En la misma gráfica, pero en el intervalo entre $t=1.5$ s y $t= 2.5$ s se aprecia una porción de recta con una pendiente igual a la gravedad. Esta porción corresponde a un intervalo de tiempo en que el bloque estaba en caída libre. Sería de esperar que las velocidades perpendiculares a la línea de la plomada fueran constantes y que únicamente en la dirección de la plomada debiera actuar la aceleración de la gravedad. Las variaciones de velocidad no esperadas que se aprecian en las gráficas son debidas a los errores en las medidas y sobretodo porque en esta versión del programa se mide sobre la superficie del bloque (y no sobre el centro de masas). Además, dado que el bloque gira durante la caída, se debe cambiar de punto de medida cada cierto tiempo buscando el centro del bloque de forma aproximada. Estos dos efectos combinados hacen que las medidas de posición tengan cierta incertidumbre (estimamos unos ± 10 cm) que se propaga al cálculo de la velocidad y demás magnitudes derivadas. Para evitar estos efectos, se está implementado un módulo que asista al usuario indicando la proyección del centro de masas del bloque vista desde la cámara, como ya se apuntaba en el apartado 4.3.

5. Propagación de los errores

Junto a los resultados preliminares hemos obtenido una estimación de los errores asociados al cálculo de la posición, la velocidad y la aceleración.

Como hemos mencionado en el apartado 4.4, el tramo de trayectoria en el intervalo de tiempo en estudio corresponde a la caída libre de un bloque entre dos impactos contra el talud. Sabemos que su centro de masas describe una parábola y, por lo tanto, hacemos un ajuste de mínimos cuadrados (Björck 1996) de las observaciones, la cota respecto del tiempo, a un polinomio de segundo grado, Ec. (3):

$$z = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 \quad (3)$$

Donde a_0 es la cota inicial, a_1 es la velocidad inicial y a_2 corresponde a la aceleración $-2g$. Los errores estimados se han calculado a partir de matraiz cofactor y la desviación tipo a posteriori y quedan reflejados en la Tabla 1.

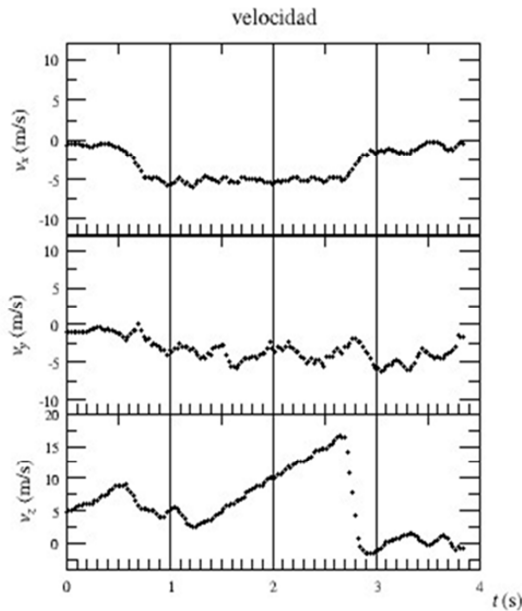


Figura 5: Velocidades respecto del tiempo, componentes de arriba a abajo: este, norte y cota ortométrica.

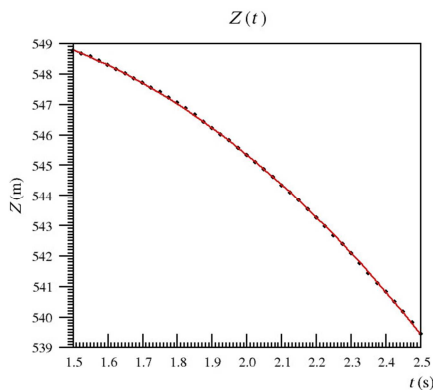


Figura 6: Porción de la Figura 5 ampliada sobre la zona en caída libre del bloque. En rojo se indica la parábola ajustada a los puntos observados.

Tabla 1: Valores resultantes del ajuste de una parábola para los valores de la cota respecto del tiempo, y sus errores.

Parámetros	Valor	Error
a_0	544.5 m	± 0.1 m
a_1	10.2 m/s	± 0.1 m/s
a_2	-4.89 m/s ²	± 0.03 m/s ²

Los dos primeros parámetros a_0 y a_1 dependen de la posición donde impacta el bloque contra la ladera y la velocidad con que rebota y no aportan nada más. Sin embargo, el parámetro a_2 está ligado a la aceleración de la gravedad que es un valor conocido $g = 9.808 \text{ m/s}^2$. Por lo tanto, comparando este valor con el valor estimado por nosotros $\hat{g} = 9.78 \pm 0.06 \text{ m/s}^2$ vemos que es compatible y, por lo tanto, dentro de los márgenes de error, queda validado todo el procedimiento descrito en este trabajo.

6. Conclusiones

En este trabajo se muestra que un levantamiento topográfico como apoyo a la fotogrametría es imprescindible para obtener coordenadas de alta precisión. Con la base de tiempo que da la electrónica de las cámaras de vídeo de alta velocidad se pueden calcular velocidades y aceleraciones precisas en cada punto de la trayectoria de un bloque. Por otra parte, si se dispone del modelo tridimensional del bloque se pueden estimar su volumen, su masa y el tensor de inercia y, a partir de aquí, la energía cinética antes y después de un impacto. De las velocidades podemos extraer los coeficientes de restitución y los balances de energía.

En el futuro inmediato se harán mejoras para medir directamente la posición del centro de masas y evitar los errores que se producen al medir sobre la superficie del bloque. También se profundizará en el análisis de la propagación de errores desde las posiciones a las velocidades y aceleraciones.

Agradecimientos

Este trabajo se enmarca dentro del proyecto de investigación titulado "Caracterización y modelización de los desprendimientos rocosos", con acrónimo Rockmodels financiado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad (BIA2016-75668-P).

References

ASTERIOU, P., SARAGLOU, H. and TSIAMBAOS, G., 2012. Geotechnical and kinematic parameters affecting the coefficient of restitution for rockfall analysis. *International J. of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **5**, pp. 103-113.

BJÖRCK, ÅKE, 1996. *Numerical Methods for Least Squares Problems*. Ed. SIAM.

BLOW, J. and ATMAN J BINSTOCK, 2004. How to find the inertia tensor (or other mass properties) of a 3D solid body represented by a triangle mesh. Internal document at: [http:// number-none.com/blow/inertia/bb_inertia.doc](http://number-none.com/blow/inertia/bb_inertia.doc) [2017].

CHAU, K.T., WONG, R.H.C and WUB, J.J., 2002. Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts. *Int.J.of Rock Mech. & Mining Sciences*. Vol. **39**, pp. 69-77.

- COROMINAS, J., LANTADA, N., GILI, J., RUIZ-CARULLA, R., MATAS, G., MAVROULI, O., NÚÑEZ-ANDRÉS, M., MOYA, J., BUILL, F., ABELLÁN, A., PUIG, C., PRADES, A., MARTÍNEZ-BOFILL, J. and SALÓ, L., 2017. THE ROCKRISK PROJECT: ROCKFALL risk quantification and prevention, in 6th Interdisciplinary Workshop on Rockfall Protection RocExs 2017.
- COROMINAS J. and MAVROULI O., 2011. Rockfall Quantitative Risk Assessment, Chapter 8. In: Lambert, S. and F. Nicot (Eds.): Rockfall engineering. ISTE Ltd & John Wiley and Sons, Inc. pp. 255–301.
- COROMINAS J., MAVROULLI O. and MOYA J., 2013. Metodología para la Evaluación Cuantitativa del Riesgo por desprendimientos de rocas en escala específica y local. VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables.
- CROSTA, G.B. and AGLIARDI, F., 2003. A new methodology for physically based rockfall hazard assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3, pp. 407–422.
- DORREN, L.K.A., 2010. Rockyfor3D revealed – description of the complete 3D rockfall model, Tech. Rep., EcorisQ, <http://www.ecorisq.org>.
- GIACOMINI, A., BUZZI, O., RENARD, B. and GIANI, G.P., 2009. Experimental studies on fragmentation of rock falls on impact with rock surfaces. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **46**(4), pp. 708–715.
- GIACOMINI, A., THOENI, K., LAMBERT, C., BOOTH, S. and SLOAN, S., 2012. Experimental study on rockfall drapery systems for open pit highwalls, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Vol **56**, pp. 171–181.
- GILI, J.A., RUIZ-CARULLA, R., MATAS, G., COROMINAS, J., LANTADA, N.; NÚÑEZ, M.A., MAVROULI, O., BUILL, F., MOYA, J., PRADES, A. and MORENO, S., 2016. Experimental study on rockfall fragmentation: in situ test design and firsts results. XII International Symposium on Landslides. Naples, Italy.
- HARTLEY, R. and ZISSERMAN, A., 2008. Multiple View Geometry. Cambridge University Press.
- JONES, C.L., HIGGINS, J.D. and ANDREW, R.D., 2000. Colorado Rock Fall Simulation Program Version 4.0. Colorado Department of Transportation, Colorado Geological Survey.
- LI, L. and LAN, H., 2015. Probabilistic modeling of rockfall trajectories: a review, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Volume **21**: 1–14.
- MATAS, G., LANTADA, N., COROMINAS, J., GILI, J.A., RUIZ-CARULLA, R. and PRADES, A., 2017a. Procedure for assessing the performance of a rockfall fragmentation model. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 19, EGU2017-17709, 2017. EGU General Assembly 2017, Vienna (Austria).
- MATAS, G., LANTADA, N., COROMINAS, J., GILI, J.A., RUIZ-CARULLA, R. and PRADES, A., 2017b. RockGis application to rockfall. Extended abstract previsto enviar a RocExs, Mayo 2017, Barcelona (España).
- PRESS, W.H., TEUKOLSKY, S.A., VETTERLING, W.T., and FLANNERY, B.P., 2007. *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*. Third edition. Cambridge University Press.
- SALCIARINI, D., TAMAGNINI, C. and CONVERSINI, P., 2009. Numerical approaches for rockfall analysis: a comparison, Pro-ceedings 18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia.
- STEVENS, W.D., 1998. RocFall: a Tool for Probabilistic Analysis, Design of Remedial Measures and Prediction of Rockfalls. A thesis submitted in conformity with the requirements for the degree of Master of Applied Science, Graduate Department of Civil Engineering, University of Toronto.
- VOLKWEIN, A., SCHELLENBERG, K., LABIOUSE, V., AGLIARDI, F., BERGER, F., BOURRIER, F., DORREN, L.K.A., GERBER, W. and JABOYEDOFF, M., 2011. Rockfall characterisation and structural protection – a review. *Natural Hazards and Earth System Science*, **11**(9).
- WANG, Y. and TONON, F., 2011. Discrete Element Modeling of Rock Fragmentation upon Impact in Rock Fall Analysis, *Rock Mechanics and Rock Engineering* **44**, pp: 23–35.
- ZHANG ZX, KOU SQ, JIANG LG and LINDQVIST PA., 2000. Effects of loading rate on rock fracture: fracture characteristics and energy partitioning. *Int J Rock Mech Min Sci* **37**, pp.745–762.

ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES EN EL ÁMBITO DEL ARTE RUPESTRE

PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS OF MULTISPECTRAL IMAGES APPLIED IN ROCK ART FIELD

Berta Carrión-Ruiz*, José Luis Lerma

Photogrammetry & Laser Scanning Research Group (GIFLE), Department of Cartographic Engineering, Geodesy and Photogrammetry, Universitat Politècnica de València, 46022 Valencia, Spain. bercarru@doctor.upv.es; jllerma@cqf.upv.es

Abstract:

This paper tackles principal component analysis (PCA) in images that include wavelengths between 380-1000 nm. Our approach is focussed on taking advantage of the potencial of ultraviolet and infrared images, in combination with the visible ones, to improve documentation process and rock art analysis. In this way, we want to improve the discrimination between pigment and support rock, and analyse the spectral behaviour of rock art paintings in the ultraviolet and infrared regions. Three images were used, one image from the ultraviolet (UV) region, one from the visible region (VIS) and another one from the near infrared region (NIR). Optical filters coupled to the camera optics were used to take the images. These filters capture specific wavelengths excluding radiation that we are not interested in registering. Finally, PCA is applied to the acquired images. The results obtained demonstrate the PCA usefulness with imagery in this field and also it is possible to extract some conclusions about the correspondent paint pigments.

Key words: Documentation, Rock Art, Decorrelation techniques, Digital image analysis, Cultural Heritage, PCA, Multispectral image

Resumen:

Este artículo aborda el análisis de componentes principales (ACP) en imágenes de longitudes de onda entre 380-1000 nm. Nuestro enfoque se centra en aprovechar el potencial que las imágenes ultravioletas e infrarrojas ofrecen, en combinación de las visibles, para mejorar la documentación y el análisis de las pinturas rupestres. De este modo, se pretende mejorar el proceso de discriminación entre pigmento y roca soporte, y analizar el comportamiento espectral de las pinturas rupestres en las regiones del ultravioleta e infrarrojo. Para el estudio, se han empleado tres imágenes, una de la región del ultravioleta (UV), una de la región del visible (VIS) y otra de la región del infrarrojo cercano (NIR). Las imágenes se tomaron con filtros acoplados a la óptica de la cámara. Estos filtros captan un rango de longitud de onda y excluyen la radiación que no interesa registrar. Por último, se realiza ACP a las imágenes tomadas. Los resultados obtenidos demuestran la utilidad del ACP en imágenes de este ámbito y también se pueden extraer algunas conclusiones sobre los pigmentos que constituyen la pintura.

Palabras clave: Documentación, Arte Rupestre, Técnicas de descorrelación, Análisis de imagen, Patrimonio cultural, ACP, Imagen multiespectral.

1. Introducción

La única radiación que puede percibir el ojo humano es la luz visible, pero esta es solo una pequeña porción del espectro electromagnético (400-700 nm). Sin embargo, algunas cámaras fotográficas específicas, son capaces de captar radiación de diferentes longitudes de onda. Actualmente, gracias al avance de las cámaras digitales, el empleo de estas imágenes para el estudio del arte rupestre está establecido como técnica esencial, que permite a los arqueólogos la extracción de calcos de las figuras, de manera no invasiva.

Un ejemplo sería el estudio realizado por Brady and Gunn (2012) se realiza un realce fotográfico en las imágenes, para realzar figuras muy deterioradas y figuras superpuestas. Otros autores mejoran el contraste en áreas específicas, mejoran los bordes de las figuras y realizan superposiciones de imágenes (Clogg *et al.* 2000). Por otro lado, en el estudio

publicado por Mark and Billo (2006), se estudia la generación de imágenes panorámicas y se desarrollan técnicas de realce de la imagen, mediante el empleo de filtros y modificaciones de los histogramas.

Al añadir un procesado a estas imágenes y aplicar técnicas de análisis multivariante, se pueden obtener datos cuantitativos que nos proporcionen información sobre multitud de aspectos de la imagen, como, por ejemplo, la variabilidad y la distribución de los pigmentos.

Una de las técnicas más populares en el análisis de imágenes es el Análisis de Componentes Principales (ACP). El ACP resulta una técnica muy útil cuando lo que se pretende eliminar la correlación entre los niveles digitales de la imagen digital. Mediante el ACP, se destacan las diferencias entre las bandas de la imagen.

Cuando las imágenes de entrada son bandas de radiación reflejada en la región visible del espectro, el

* Corresponding Author: Berta Carrión-Ruiz, bercarru@doctor.upv.es

empleo del ACP resulta especialmente útil, ya que las bandas de entrada se encuentran muy correlacionadas y es necesario el empleo de algoritmos que reduzcan los datos redundantes.

En el ámbito del arte rupestre este tipo de análisis de la imagen se aplica en la mayoría de los casos, a la mejora del proceso de identificación de motivos (Cerrillo-Cuenca and Sepúlveda 2015; Le Quellec *et al.* 2015; Mark and Billo 2002; Rogerio-Candeleira *et al.* 2011). Además, se ha comprobado que estas técnicas de eliminar la correlación de la imagen automatizan parte del proceso de extracción de calcos, mejorándolo y acelerándolo (Carrión-Ruiz *et al.* 2016; Domingo *et al.* 2015).

En la documentación del arte rupestre, generalmente se aplica el ACP a imágenes de la región visible del espectro. Creemos interesante, ampliar las regiones espectrales de estudio para, de esta forma, aprovechar su potencial, tal y como se hace en otros campos como en la medicina o en la teledetección.

En el campo de la conservación del arte, tanto las imágenes de la región ultravioleta (UV), como las de la región del infrarrojo cercano (NIR), resultan muy útiles. La región infrarroja se utiliza para detectar repintes o tintas no visibles a simple vista (Degrigny *et al.* 2016; Hedjam and Cheriet 2013; Legnaioli *et al.* 2013). Por otro lado, numerosos pigmentos empleados en arte sobre lienzo resultan fluorescentes a la luz ultravioleta (Cosentino 2014), por lo que el estudio de la repuesta espectral de los pigmentos en esta región resulta muy interesante.

Este estudio investiga las posibilidades del ACP, aplicado en imágenes multiespectrales que abarcan longitudes de onda desde los 380 nm hasta los 1000 nm aproximadamente. Nuestro enfoque pretende aprovechar al máximo el potencial de las imágenes UV y NIR para de esta forma, lograr una mejor documentación y análisis de las pinturas rupestres del Arco Levantino, un bien cultural altamente deteriorado (UNESCO 2017). Además, se pretende aportar información en cuanto a la reflectancia de los pigmentos y su comportamiento espectral para de esta manera enriquecer la documentación y avanzar en la investigación de nuevas técnicas de documentación no invasivas.

2. Instrumental utilizado

2.1. Cámara

Los sensores de imagen pasivos que podemos encontrar en las cámaras digitales las hacen dispositivos capaces de registrar la radiación reflejada de una escena.

Generalmente cualquier cámara del mercado, tanto las cámaras profesionales como las indicadas para el público general, tienen un filtro que bloquea la radiación IR y/o UV delante del sensor.

Debido a esto, para la toma de imágenes de diferentes intervalos del espectro electromagnético se ha empleado una cámara que no tiene ningún tipo de filtro de bloqueo acoplado al sensor. La cámara empleada es el modelo IS Pro de la marca Fujifilm (FUJIFILM

2017). Esta cámara es específica para la realización de fotografía médica y científica, su sensor CCD tiene una sensibilidad desde los 380 nm hasta los 1000 nm aproximadamente. Debido al rango espectral que abarca, es posible obtener imágenes de regiones del espectro no visibles para el ojo humano tanto en la región del UV, como en la región del NIR.

2.2. Óptica

El empleo de una óptica adecuada es indispensable para obtener fotografías de buena calidad en cualquier región del espectro, pero, al realizar fotografía UV, la óptica utilizada es especialmente importante. En este caso acoplamos un objetivo de cuarzo, modelo Coastal Optical UV-VIS-IR Apo Macro de 60 mm.

2.3. Filtros externos

El uso de filtros externos es una solución económica para fotografiar intervalos específicos de longitudes de onda. Dentro del intervalo que registra la cámara (380-1000 nm) podemos discriminar intervalos de longitud de onda más cortos al acoplar filtros a la lente. Con este objetivo se han empleado cuatro filtros diferentes de la marca Midwest Optical Systems:

- El filtro BP-365 está diseñado para bloquear la radiación de la región del visible y deja pasar la radiación ultravioleta desde los 335 nm hasta los 400 nm (Fig. 1). Sin embargo, este filtro también capta radiación infrarroja a partir de los 830 nm. Por tanto, para obtener imágenes que únicamente muestren la radiación ultravioleta reflejada es necesario aplicar otro filtro que bloquee la componente de radiación infrarroja.
- El filtro SP-730 bloquea la radiación infrarroja a partir de los 710 nm aproximadamente (Fig. 2).
- El filtro BP-550 tiene un paso de banda amplio, entre los 410 y los 690 nm aproximadamente (Fig. 3). Este filtro solo capta luz de la región del visible.
- El filtro LP-1000, capta la radiación infrarroja transmitida desde los 860 nm hasta los 1500 nm aproximadamente (Fig. 4).

Por tanto, las imágenes del UV, se obtienen mediante la combinación del filtro BP-365 y el filtro SP-730, para de esta forma, bloquear la componente infrarroja que tiene el filtro BP-365. Por otro lado, las imágenes del NIR se obtienen aplicando el filtro LP-1000 al objetivo de nuestra cámara. Por último, las imágenes del VIS se realizan con el filtro BP-550.

3. Caso de estudio: La cova dels Cavalls

La toma de datos in situ en el ámbito del arte rupestre siempre es una tarea complicada que exige una planificación exhaustiva. Este tipo de bienes culturales normalmente se encuentran localizados en zonas de difícil acceso y expuestas a agentes de erosión y deterioro. Esto hace que sea urgente y necesaria la documentación y análisis de este tipo de bienes mediante técnicas no invasivas, que permitan estudiar en profundidad la problemática que en ellos se encuentra.

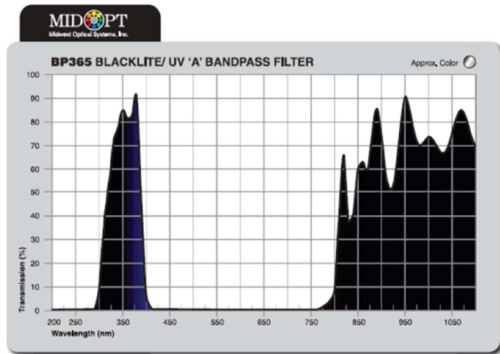


Figura 1: Porcentaje de trasmisión del filtro BP-365 en diferentes longitudes de onda (<http://midopt.com/filters/>).

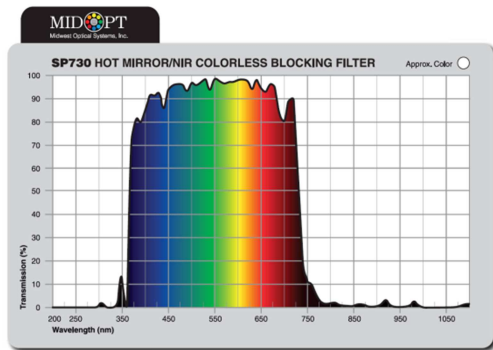


Figura 2: Porcentaje de trasmisión del filtro SP-730 en diferentes longitudes de onda (<http://midopt.com/filters/>).

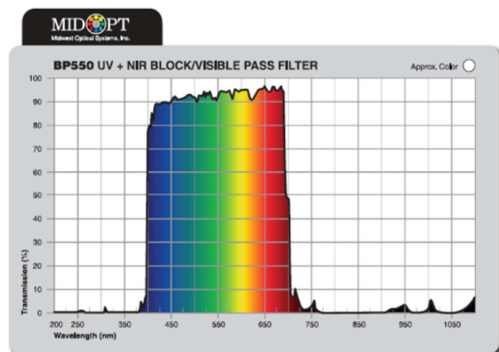


Figura 3: Porcentaje de trasmisión del filtro BP-550 en diferentes longitudes de onda (<http://midopt.com/filters/>).

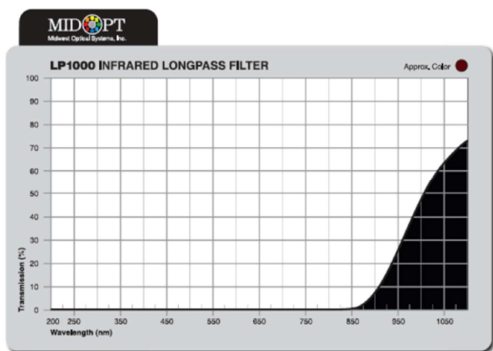


Figura 4: Porcentaje de trasmisión del filtro LP-1000 en diferentes longitudes de onda (<http://midopt.com/filters/>).

En este estudio se pretende la documentación y análisis de los motivos que se encuentran en La Cova dels Cavalls. La Cova dels Cavalls se emplaza en uno de los márgenes del Barranc de la Valltorta (Fig. 5) en la provincia de Castellón (España).



Figura 5: Contexto de La Cova dels Cavalls

La cueva está compuesta por dos abrigos, en el abrigo II, orientado al noreste, se sitúa el motivo que se va a analizar (Fig. 6). Actualmente, la mayoría de los motivos, se encuentran deteriorados y es difícil su reconocimiento in situ.

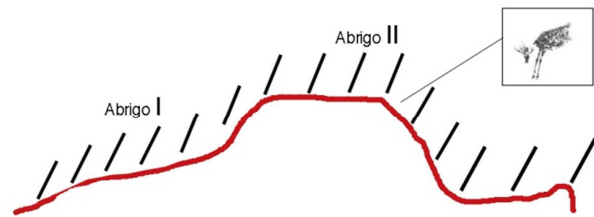


Figura 6: Ubicación en planta de la figura de estudio de La Cova dels Cavalls (adaptación a partir de Martínez and Villaverde 2002)

Estos motivos de arte rupestre se han estudiado y documentado desde un punto de vista arqueológico (Martínez and Villaverde 2002).

3.1. Toma de imágenes *in situ*

Se han adquirido imágenes en tres bandas espectrales, UV (380-400 nm), VIS (410-690 nm) y NIR (860-1000 nm). En la adquisición de estos tres tipos de imágenes, la focal, el número ISO, la posición de la toma y el encuadre se mantuvieron constantes, en cambio, la combinación de filtros aplicados y los parámetros de exposición y apertura del diafragma variaron en función de las necesidades de la cámara en cada disparo (Tabla 1).

Tabla 1. Parámetros de la cámara en cada una de las imágenes

	UV	VIS	NIR
Filtro	BP-365+SP-730	BP-550	BP-1000
Focal (mm)	60	60	60
ISO	100	100	100
Abertura (f)	11	11	11
Exposición (s)	1/5	1/20	1

El formato empleado ha sido el RAF, que es el formato propio del fabricante Fujifilm para el almacén de los datos crudos (RAW). De acuerdo con Verhoeven and Schmitt (2010) la profundidad del color es mayor en las imágenes RAW y ofrece la posibilidad de corregir algunos parámetros de la toma, como por ejemplo la exposición.

3.2. Análisis de la imagen digital

Las imágenes obtenidas contienen la información dividida en tres canales, Rojo (R), Verde (G) y Azul (B). En el caso de las imágenes ultravioletas el canal que contiene la información útil es el canal B; en los otros dos canales la mayoría de sus píxeles están en negro (Fig. 7).

Por otro lado, en las imágenes infrarrojas, sus tres canales son similares entre ellos. Por tanto, podemos escoger cualquiera de los tres canales, ya que la información que contienen es prácticamente la misma (Fig. 8).

Sin embargo, las imágenes de la región del visible contienen información válida en cada uno de sus canales (Fig. 9).

Por tanto, en los posteriores análisis se han empleado:

- El canal B de imagen UV (UV-B).
- El canal R de la imagen NIR (NIR-R).
- Los canales R, G y B de la imagen VIS (VIS-R, VIS-G, VIS-B).

3.2.1. Análisis de Componentes Principales (ACP)

Una de las técnicas más comunes de análisis de imagen es el ACP. Esta técnica se engloba dentro del análisis estadístico multivariante y nos permite la reasignación de los niveles digitales de la imagen (ND), cambiando el sistema de referencia y eliminando la correlación de los datos de entrada.

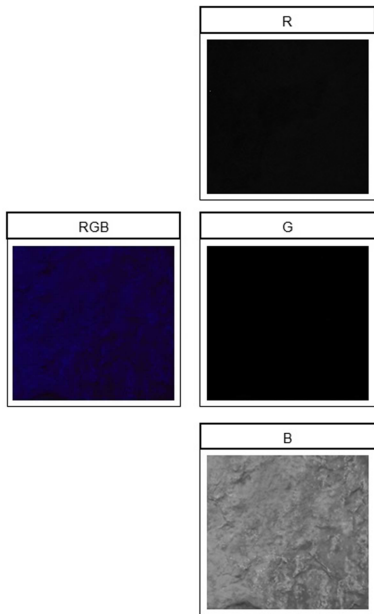


Figura 7: Canales R, G y B de la imagen UV.

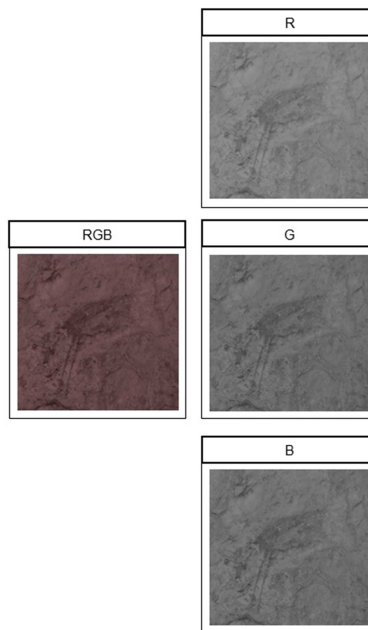


Figura 8: Canales R, G y B de la imagen NIR.

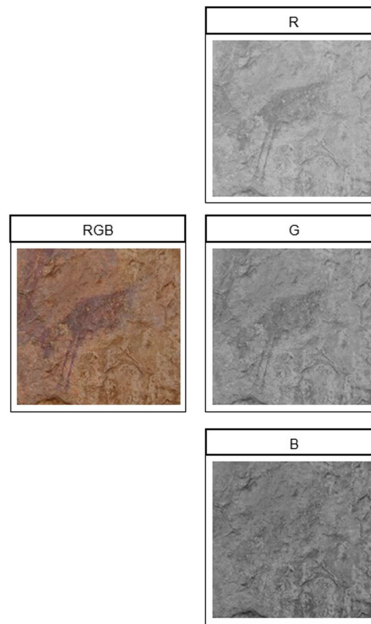


Figura 9: Canales R, G y B de la imagen VIS.

Como resultado de este análisis se obtiene un grupo de nuevas imágenes llamadas Componentes Principales (CP). El número de CP dependerá del número de imágenes de entrada. En este caso, se parte de cinco imágenes de entrada y se obtienen cinco CP tras el análisis, tal y como se puede comprobar en la Figura 10.

En estos cinco componentes, la información que contenían las cinco imágenes de entrada está reordenada de manera diferente. Algunos autores (Cerrillo-Cuenca and Sepúlveda, 2015; Rogerio-Candelera 2013) comentan en sus estudios la importancia de los últimos componentes ya que suelen contener información residual importante. Además, en algunos casos es posible detectar elementos, que, en las imágenes previas al análisis, son invisibles.

Al analizar el porcentaje de varianza en la Tabla 2, observamos que el CP 1 contiene un 71% de información aproximadamente. Cuando visualizamos la imagen del CP 1 observamos que esta imagen no aporta información relevante (Fig. 11); la figura no está realzada y las sombras de la roca no desaparecen.

Tabla 2. Porcentajes de varianza y varianza acumulada.

	Varianza (%)	Varianza acumulada (%)
CP 1	71,43	71,43
CP 2	13,70	85,14
CP 3	13,26	98,40
CP 4	1,24	99,64
CP 5	0,36	100,00

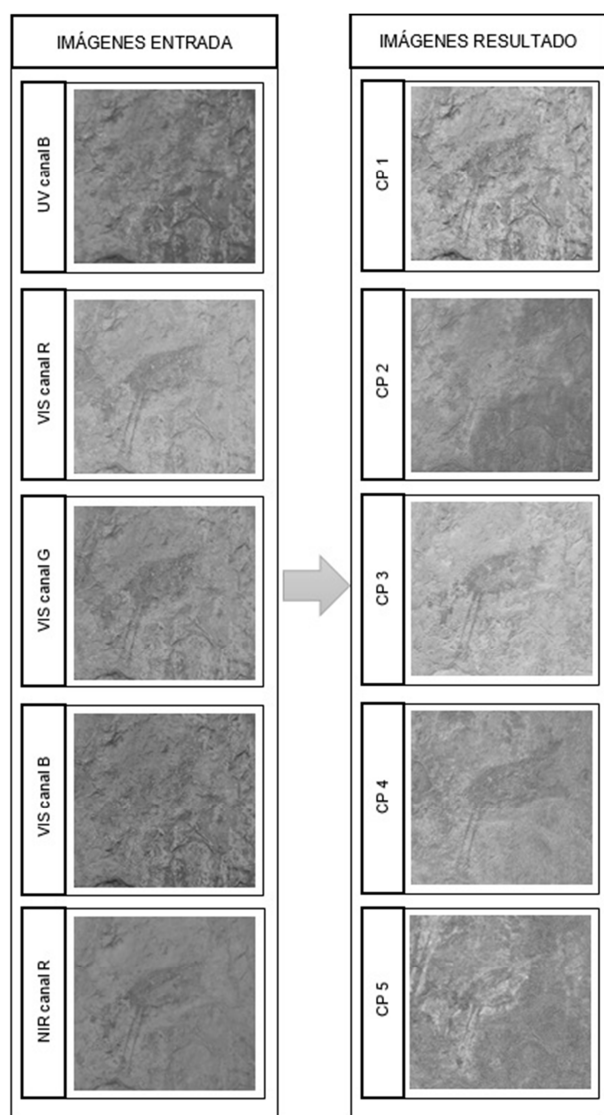


Figura 10: Imágenes de entrada y salida en ACP.

El CP 2 y CP 3, contienen cada uno un 13 % de la información aproximadamente. En el CP 2, la figura desaparece dejando únicamente un rastro blanquecino y se enfatizan los pliegues y surcos de la roca. Por otro lado, al analizar visualmente la imagen resultante del

CP3 (Fig. 12), se observa que el contorno de la figura se encuentra muy detallado en ella.

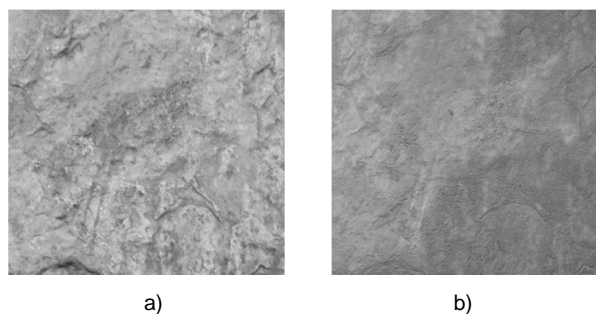


Figura 11: Componentes principales: a) CP 1, b) CP 2.



Figura 12: CP 3.

Los CP 4 y 5 observamos que contienen la información residual ya que tienen porcentajes de varianza muy bajos (Tabla 2). Estos dos últimos componentes son los que ofrecen información más relevante. Si observamos el CP 4 (Fig. 13), los trazos del cuerpo y las extremidades delanteras del animal aparecen realzados en gris oscuro, aunque la parte trasera del animal se encuentra bastante difuminada. También, la cabeza se difumina y se hace transparente llegando a ser casi imperceptible. Por último, el CP 5 (Fig. 14) realza en color gris claro un halo alrededor de la figura.

4. Discusión

El análisis detallado de los componentes principales obtenidos no resulta determinante, ya que no es posible afirmar que existen pigmentos diferentes. En teoría, toda la figura ha sido ejecutada con pigmentos de color rojo, aunque sí que se observan cambios en la concentración del pigmento. A consecuencia de estos cambios de concentración, se observan varios tomos de rojo diferentes. Por un lado, un color rojo oscuro, con un trazo muy definido en todo el contorno de la figura, especialmente en las extremidades y delimitando el lomo. Por otro lado, también hay áreas con un rojo más claro alrededor de toda la figura, algunas zonas del relleno del cuerpo y la cabeza del animal.



Figura 13: CP 4.



Figura 14: CP 5.

El primer componente, no ayuda a la discriminación del pigmento de la roca soporte, ya que la figura no se realza, las sombras de la roca no desaparecen y tampoco revela una diferenciación de pigmentos.

El CP 2 y el CP 3, sí pueden resultar útiles en relación a la discriminación entre pigmento y roca soporte. El primero (CP 2), únicamente contiene información del soporte, y el segundo (CP 3), realza la capa de pigmento permitiendo su delimitación de manera más cómoda y rápida.

En cuanto al comportamiento de la luz reflejada es posible extraer conclusiones en cuanto a la composición química del pigmento, los últimos dos componentes son los que proporcionan información más valiosa al respecto. La parte de la cabeza del animal desaparece en el CP 4, quedando únicamente la parte del cuerpo y extremidades. Esta separación puede deberse a una

densidad diferente de la capa pigmento en esa zona. Esto puede ser debido a que el dibujo de la figura se ha realizado en tiempos diferentes, o a diferencias de grosor en la capa de pigmento durante la ejecución. Por otro lado, el último componente realza zonas alrededor de la figura formando un halo. Estas áreas, podrían corresponderse con zonas que han sido recientemente restauradas.

Por tanto, en este caso, sería necesario contrastar estas conclusiones mediante otras técnicas, que, aunque más invasivas, determinarían la composición química de las zonas en las que se observan anomalías o se presentan como potenciales zona de estudio. Por tanto, el ACP sí que resulta útil como primera aproximación al estudio de una figura, es decir, como trabajo previo al empleo eventual (no siempre requerido ni recomendable) de técnicas más invasivas, una vez detectadas las partes más susceptibles de estudio de una figura.

Por último, merece la pena comentar las ventajas del empleo de imágenes de diferentes ventanas espectrales. En este estudio, en la imagen UV-B desaparece el pigmento y se acentúan los pliegues e irregularidades de la roca, por lo que esta imagen puede resultar útil para discriminar el pigmento de la roca soporte. También la imagen NIR-R presenta ventajas al agregarla al ACP. Muestra realizadas las partes de la figura con pigmento de color rojo oscuro. Sin embargo, las zonas con pigmento de color rojo claro se hacen transparentes. Esto refleja un comportamiento espectral diferente entre estos dos colores.

5. Conclusión

Este artículo analiza las ventajas del empleo de imágenes multiespectrales y de las técnicas de análisis de imagen digital, de modo que el proceso de discriminación entre el pigmento y la roca soporte sea más rápido y objetivo.

Además, atendiendo al comportamiento espectral de los motivos que se encuentren en la escena y la roca que los soporta, es posible enriquecer el estudio de una figura o incluso ampliar el ámbito de estudio e interpretar los resultados de una escena completa o incluso todas las figuras que se encuentren en un mismo abrigo.

Como se constata en este estudio, la aplicación del ACP no causa ninguna pérdida de información, al contrario, aporta una nueva visión de los datos originales. Si además se añade información de diferentes bandas del espectro, se añade también información de cómo se comportan los elementos fotografiados, en este caso, los pigmentos y la roca soporte. Por ello, sería interesante establecer una respuesta espectral frente a la cámara, de cada tipo de pigmento empleado en este tipo de arte, para cada banda espectral registrada.

Por último, sería conveniente profundizar en el estudio de otras técnicas de análisis multivariante y ampliar el ámbito de estudio a toda la escena.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del Ministerio de Economía y Competitividad al Proyecto HAR2014-59873-R.

References

- BRADY, L.M. and GUNN, R.G., 2012. Digital Enhancement of Deteriorated and Superimposed Pigment Art. *Rock Art in the Digital Age*, pp. 627–643.
- CARRIÓN-RUIZ, B., BLANCO-PONS, S. and LERMA, J.L., 2016. Digital image analysis of the visible region through simulation of rock art paintings. *Proc. 8th Int. Congr. Archaeol. Comput. Graph. Cult. Herit. Innov. "ARQUEOLÓGICA 2.0"*, pp. 169–175. DOI: 10.4995/arqueologica8.2016.3560.
- CERRILLO-CUENCA, E. and SEPÚLVEDA, M., 2015. An assessment of methods for the digital enhancement of rock paintings: The rock art from the precordillera of Arica (Chile) as a case study. *J. Archaeol. Sci.*, **55**, pp. 197–208. DOI: 10.1016/j.jas.2015.01.006.
- CLOGG, P., DÍAZ-ANDREU, M. and LARKMAN, B., 2000. Digital Image Processing and the Recording of Rock Art. *J. Archaeol. Sci.*, **27**, pp. 837–843. DOI: 10.1006/jasc.1999.0522.
- COSENTINO, A., 2014. Identification of pigments by multispectral imaging; a flowchart method. *Herit. Sci.*, **2**, 8. DOI: 10.1186/2050-7445-2-8.
- DEGRIGNY, C., PIQUÉ, F., PAPIASHVILI, N., GUERY, J., MANSOURI, A., LE GOÏC, G., DETALLE, V., MARTOS-LEVIF, D., MOUNIER, A., WEFERS, S., TEDESCHI, C., CUCCHI, M., VALLET, J., PAMART, A. and PINETTE, M., 2016. Technical Study of Germolles ' Wall Paintings : the Input of Imaging Techniques. *Virtual Archaeol. Rev.*, **7**, pp. 1–8.
- DOMINGO, I., CARRIÓN, B., BLANCO, S. and LERMA, J.L., 2015. Evaluating conventional and advanced visible image enhancement solutions to produce digital tracings at el Carche rock art shelter. *Digit. imaging Tech. study Prehist. rock art.*, **2**, pp. 79–88. DOI: 10.1016/j.daach.2015.01.001.
- FUJIFILM, 2017. Fujifilm Is Pro Important Notices and Disclaimers. Available: [https://www.fujifilmusa.com/shared/bin/IS Pro IMPORTANT NOTICES AND DISCLAIMERS .pdf](https://www.fujifilmusa.com/shared/bin/IS_Pro_IMPORTANT_NOTICES_AND_DISCLAIMERS.pdf).
- HEDJAM, R. and CHERIET, M., 2013. Historical document image restoration using multispectral imaging system. *Pattern Recognit.*, **46**, pp. 2297–2312. DOI: 10.1016/j.patcog.2012.12.015.
- LE QUELLEC, J.L., DUQUESNOY, F. and DEFASNE, C., 2015. Digital image enhancement with DStretch: Is complexity always necessary for efficiency?. *Digit. Appl. Archaeol. Cult. Herit.*, **2**, pp. 55–67. DOI: 10.1016/j.daach.2015.01.003.
- LEGNAIOLI, S., LORENZETTI, G., CAVALCANTI, G.H., GRIFONI, E., MARRAS, L., TONAZZINI, A., SALERNO, E., PALLECCHI, P., GIACHI, G. and PALLESCHI, V., 2013. Recovery of archaeological wall paintings using novel multispectral imaging approaches. *Herit. Sci.*, **1**, 33. DOI: 10.1186/2050-7445-1-33.
- MARK, R. and BILLO, E., 2002. Application of Digital Image Enhancement in Rock Art Recording. *Am. Indian Rock Art*, **28**, pp. 121–128.
- MARK, R. and BILLO, E., 2006. COMPUTER-ASSISTED PHOTOGRAPHIC DOCUMENTATION OF ROCK ART. *Mosaic A J. Interdiscip. Study Lit.* pp. 10–14.
- MARTÍNEZ, R. and VILLAVERDE, V., 2002. La cova dels cavalls en el Barranc de la Valltorta.
- ROGERIO-CANDELERA, M.Á., 2013. Experiencias en la documentación de pintura rupestre utilizando técnicas de análisis de imagen: avances hacia el establecimiento de protocolos de documentación no invasivos. *Cuad. Arte Rupestre*, **6**, pp. 53–67.
- ROGERIO-CANDELERA, M.A., JURADO, V., LAIZ, L. and SAIZ-JIMENEZ, C., 2011. Laboratory and in situ assays of digital image analysis based protocols for biodeteriorated rock and mural paintings recording. *J. Archaeol. Sci.*, **38**, pp. 2571–2578. DOI: 10.1016/j.jas.2011.04.020.
- UNESCO, 2017. <http://whc.unesco.org/es/list/874>.
- VERHOEVEN, G.J. and SCHMITT, K.D., 2010. An attempt to push back frontiers - digital near-ultraviolet aerial archaeology. *J. Archaeol. Sci.*, **37**, pp. 833–845. DOI: 10.1016/j.jas.2009.11.013.

SOFTWARE DEVELOPMENT FOR COLOURIMETRIC AND SPECTRAL DATA PROCESSING: PYCOLOURIMETRY

DESARROLLO DE SOFTWARE PARA EL TRATAMIENTO DE DATOS COLORIMÉTRICOS Y ESPECTRALES: PYCOLOURIMETRY

Adolfo Molada-Tebar*, José Luis Lerma, Ángel Marqués-Mateu

Department of Cartographic Engineering, Geodesy, and Photogrammetry, Universitat Politècnica de València, 46022 Valencia, Spain.
admote@doctor.upv.es; jlerma@cgf.upv.es; amarques@cgf.upv.es

Abstract:

Archaeological documentation is a complex process where the technical measurement and specification of colour is a key aspect. In the last years heritage documentation processes have largely benefited from the application of digital recording methods, imagery analysis software and technologies that offers great advantages over the traditional methods. The rigorous processing of colourimetric data requires software packages with specific colourimetric technical characteristics. In this paper we report on our in-house pyColourimetry software that was developed and tested taking into account the recommendations of the *Commission Internationale de l'Éclairage* (CIE). The objective is to apply a rigorous procedure for the characterisation of cameras based a priori on polynomial models. Most of the digital cameras capture colour information in the well-known RGB format, but the signals generated by the digital camera are device dependent. By means of the characterisation we establish the relationship between device dependent RGB values and the tristimulus coordinates defined by the CIE standard colourimetric observer. Once the camera is characterised, users have the potential to obtain output images in the sRGB space that is independent of the sensor of the camera. pyColourimetry software allows users to control the entire digital image processing and the colourimetric data workflow proposed. We applied the methodology on a set of pictures targeting Levantine rock art motifs in Cova dels Cavalls (Castellón, Spain) which is considered part of a UNESCO World Heritage Site. The outcomes obtained are satisfactory and very promising for proper colour documentation in cultural heritage studies.

Key words: Camera characterisation, Rock Art, Colourimetry, CIE Colour spaces, Python

Resumen:

La documentación del patrimonio arqueológico es un proceso complejo donde la correcta medición del color es un aspecto clave. En los últimos años los procesos de documentación se han beneficiado gracias al uso de imágenes digitales, software de tratamiento de imágenes, así como de otras tecnologías frente a los métodos tradicionales. El procesamiento riguroso de datos colorimétricos requiere paquetes de software con características técnicas específicas. En este artículo presentamos un informe sobre el software pyColourimetry, desarrollado y testado teniendo en cuenta las recomendaciones de la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE). Mediante este software el usuario puede caracterizar cámaras digitales a partir de modelos polinomiales. La mayoría de cámaras digitales captan información del color en el conocido sistema RGB. Sin embargo, la señal generada depende del dispositivo. A partir de la caracterización establecemos la relación entre los valores RGB dependientes y las coordenadas independientes CIE triestímulo. Una vez caracterizada la cámara se obtienen imágenes en el espacio sRGB, independiente del sensor empleado. El software pyColourimetry permite a los usuarios controlar todo el procesamiento digital de imágenes y el flujo de trabajo de datos colorimétricos propuesto. Aplicamos la metodología a un conjunto de imágenes que contienen motivos de arte rupestre levantino pertenecientes a la Cova dels Cavalls (Castellón, España), considerada parte del Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO. Los resultados obtenidos son satisfactorios y muy prometedores para la correcta documentación del color en estudios de patrimonio cultural.

Palabras clave: Caracterización de cámaras, Arte rupestre, Colorimetría, Espacios de color CIE, Python

1. Introduction

Colour is a fundamental feature for proper cultural heritage documentation. The correct colour definition allows a more comprehensive graphic definition, a better understanding of the scene, and provides relevant technical information especially for study and preservation work (Ruiz and Pereira 2014). The problem is that colour is a matter of perception. Colour vision

depends on the observer. A rigorous colourimetric technique is necessary to properly support rock art research (Korytkowski and Olejnik-Krugly 2017; Ohta and Robertson 2005).

More and more it is becoming frequent to combine classical documentation techniques based on perceptual procedures with rigorous procedures, supported by colourimetric measurements and digital images (Apollonio *et al.* 2014; Palomar-Vazquez *et al.* 2017).

* Corresponding Author: Adolfo Molada-Tebar, admote@doctor.upv.es

Moreover, given the characteristics of archaeological rock art and the singularity of Levantine rock art in particular, a correct analysis of iron-based pigments is of great importance, where the colour is decisive. Such pigments show spectral properties that allow for their discrimination in the visible wavelengths (Hunt *et al.* 1971; Clark 1999).

A correct calibration of the imaging system, geometrically as well as radiometrically, is important in order to obtain reliable data and analyse the corresponding information. This fact is important for instance while documenting rock art (Sebastián *et al.* 2013).

The problem is that RGB signals generated by digital cameras are not colourimetrically sound, specifically, the output RGB values are device-dependent and do not directly correspond to the device independent tristimulus values based on the CIE standard colorimetric observer (CIE 2004).

An approach to transform RGB dependent values into a independent colour space (such CIE XYZ or sRGB which is somehow based on CIE XYZ), is the digital camera characterisation by polynomial regression with least squares fitting (Balasubramanian 2003; Westland *et al.* 2012; Malacara 2011). Once the RGB to CIE XYZ transformation equations are obtained, a conventional digital camera could be used for rigorous colour determination as if it were a colourimeter (Martínez-Verdú *et al.* 2003).

A final transformation from CIE XYZ to sRGB space is still necessary though. As a result, we obtain sRGB images in a well-known physically based colour space which can be rendered in compatible sRGB devices (International Electrotechnical Commission 1998).

Software systems with very specific characteristics are required to apply the methodological process exposed. There are different software options for the processing of colourimetric samples and digital image processing. One considerable limitation is that they generally do not allow the user to have absolute control on the methodological process, raw data management or output postprocessing.

We have developed our own software for the processing of colourimetric and spectral data, named pyColourimetry, which allows us to achieve a full control of the established methodological process.

2. Software development process

2.1. Main features

The computer software pyColourimetry consists of a set of modules (based on the main CIE colourimetric technical recommendations) that allows users to process colourimetric data, obtain the transformation equations for the characterisation of the camera, and apply the equations on the image to yield images in the final sRGB space (Fig. 1).

The programming language used was Python, which has become a mature language and has all the features required for scientific computing (Oliphant 2007; Van Rossum and Drake 2010).

Python is an interpreted, multiplatform programming language and has a GNU general public license that guarantees end users the freedom to use, study, share and modify the software.

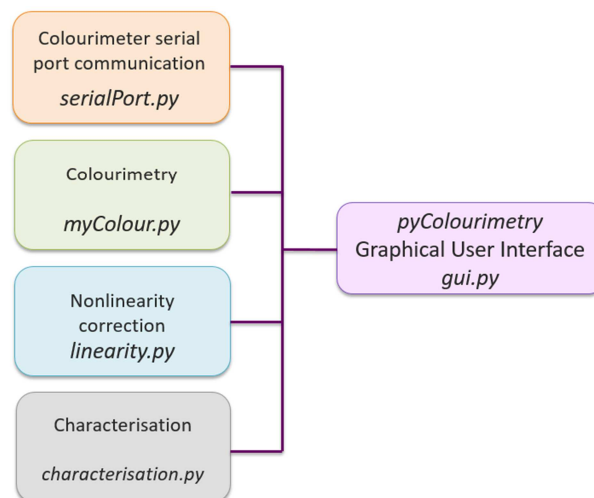


Figure 1: pyColourimetry modules.

The main functionalities of each module are listed in Table 1.

Table 1: Functionalities of the pyColourimetry software.

Module	Functionality
serialPort.py	Serial port scanning and detection Communication with the CS-100A colourimeter
myColour.py	Transformation among colour spaces Colour difference transformation
linearity.py	Raw data processing Computation of p linearity exponents
characterisation.py	Setting the characterisation parameter
gui.py	Graphical user interface (GUI) Integration of modules User input Generation of reports Generation of sRGB images

Using the serialPort.py module, we can connect the CS-100A colourimeter according to the communication specifications of the manufacturer to retrieve colourimetric data.

Although there are Python libraries for colorimetric data processing, a module called myColour.py has been implemented to handle the main CIE colour spaces for the 2° standard observer and the D65 illuminant such as CIE XYZ, Yxy, RGB, CIELAB and CIELCH (CIE, 2004).

The camera characterisation process is carried out in two steps. First, nonlinearity correction of the pixel values is computed (linearity.py). In the second step, the coefficients of the RGB to CIE XYZ transformation equations are obtained from the selected patches of the colour chart (characterisation.py). Once the

characterisation is finished, we apply the RGB to CIE XYZ transformation equations on the input image.

2.2. Graphical User Interface

The main module of the pyColourimetry software is undoubtedly the graphical user interface (GUI) called `gui.py`. It allows the user to apply the methodological process in a controlled manner to collect colourimetric data, to extract RGB data (in different image formats, RAW, JPEG and TIF), to characterise digital cameras and finally to apply the polynomial equations to obtain images in the device independent colour system sRGB.

The GUI has been designed from the PyQt library, a multiplatform binding of the Qt graphical library for Python. It has been intended that the interface be simple, intuitive, easy-to-use and attractive with technical and professional appearance (Fig. 2).

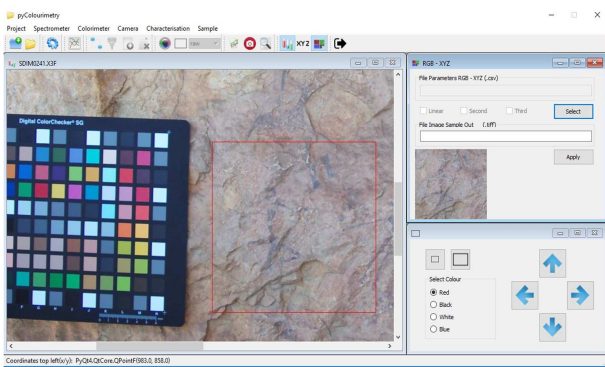


Figure 2: pyColourimetry GUI showing a rock art specimen.

3. Digital camera characterisation process

The standard way to correctly describe colours with digital cameras is by processing images after the colourimetric camera characterisation. In pyColourimetry we implemented the polynomial method because it gives substantially the same results as other methods and offers lower pre-processing and computational cost.

Results from previous experiences show that good results can be obtained using second order polynomial transformation equations (Westland *et al.* 2012; Balasubramanian 2003).

By means of the camera characterisation we establish the relationship between the device dependent RGB data and the tristimulus values defined by the CIE standard colourimetric observer.

In this process, we need several sets of samples with RGB data from the selected colour patches. A training sample will serve as reference for setting the characterisation parameter, which establishes the relationship between the RGB data and the CIE XYZ tristimulus coordinates. Additionally, a testing sample to evaluate the quality of the applied adjustments is required (Fig. 3).

In this study, we used the CIE XYZ colour space to set the transformation parameters RGB-CIE XYZ, and the CIELAB colour space for the analysis of the accuracy achieved with the polynomial adjustments. Colour accuracy is measured by computing the CIE76 colour difference formula ΔE_{ab}^* (CIE 2004) between the imaged

results of the standard target patches and their theoretical colour values through Eq. (1):

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L_{ab}^*)^2 + (\Delta a_{ab}^*)^2 + (\Delta b_{ab}^*)^2} \quad (1)$$

Finally, once the transformation equations are determined, we can represent the output image in the sRGB colour space.

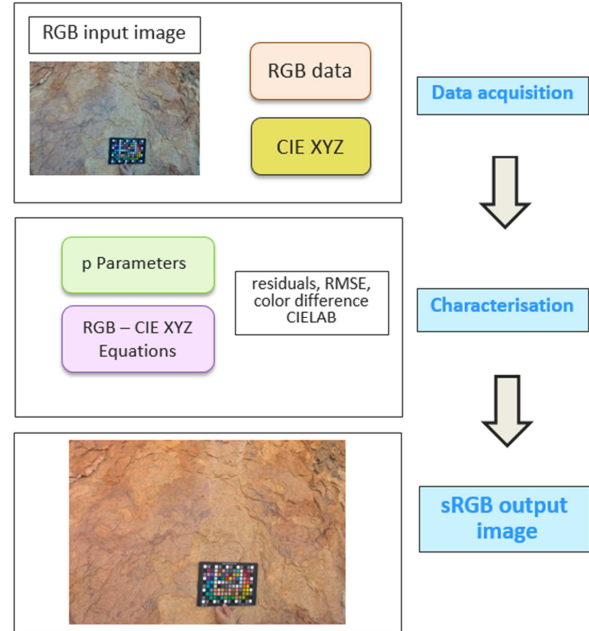


Figure 3: Digital camera characterisation workflow.

4. Case study

We applied the methodology on a picture shot on a rock art site, called Cova dels Cavalls (Tirig, Castellón), one of the most singular rock art caves of the Mediterranean Basin on the Iberian Peninsula (Fig. 4). This site was included in the UNESCO World Heritage list in 1998.

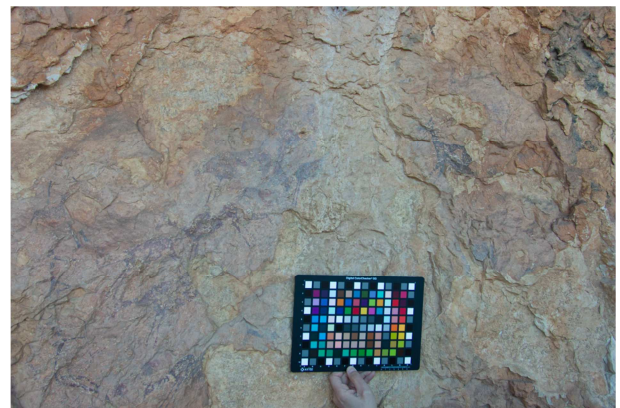


Figure 4: Example of data acquisition on site in Cova dels Cavalls. Partial view of Shelter II.

A single lens reflex (SLR) camera SIGMA SD15 was used to capture raw images. The main advantage of this camera is its three-layer Foveon@X3 direct image sensor. It directly collects all three primary RGB colours for each pixel without interpolation (Sigma Corporation 2010).

The picture contained a colour chart which acts as colour reference. In this case study we used the X-write ColorChecker SG Digital Colour Chart with 140 colour patches. From the image of the rock art scene with the colour chart we need to extract the raw RGB data and obtain the polynomial parameters for the camera characterisation (Fig. 5).

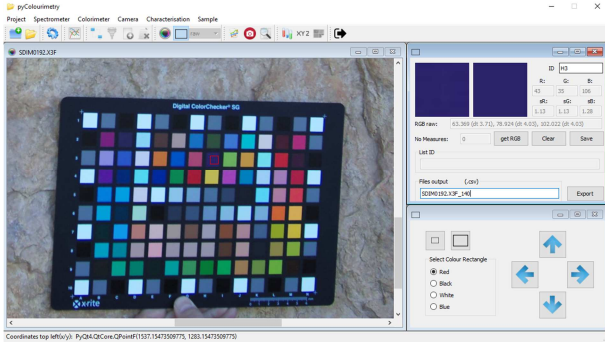


Figure 5: Get RGB data with pyColourimetry software.

Once the parameters are calculated, we apply the RGB to CIE XYZ transformation equations on the input image. A final transformation from CIE XYZ to sRGB space is still necessary to obtain the output image in a device independent, physically based colour space, which can be rendered in all devices compatible with the sRGB colour space.

Three polynomial models were considered: linear, second and third order (Westland *et al.* 2012). The number of coefficients to be determined is 3, 10 and 19, respectively, depending on the degree of the polynomial (Table 2).

Table 2: Transformation coefficients matrix (first, second and third order).

Polynomial order	Transformation coefficients
1st order	R G B
2nd Order	R G B R ² G ² B ² RG RB GB 1
3rd Order	R G B R ² G ² B ² RG RB GB R ³ G ³ B ³ R ² G R ² B G ² R G ² B B ² R B ² G 1

The pyColourimetry software provides statistical estimators and residuals to analyse the quality assessment of the applied adjustments. It allows users to select the optimum coefficients for the device characterisation as well.

5. Results

In order to evaluate the results obtained after characterisation, we analysed both the root mean square errors (RMSE) and ΔE_{ab}^* mean colour differences for the three least squares adjustments using first, second and third order polynomials. The results obtained for each adjustment applied are shown in Table 3.

The lowest RMSE were found in the second order polynomial adjustment. Considering the RMSE values only, we could conclude that both the first and second order transformations offered similar results. On the other hand, the adjustment with the major RMSE errors is found in the third order transformation.

In addition to the RMSE errors it is required to analyse the values obtained for the colour differences. Values of ΔE_{ab}^* colour differences less than 4 CIELAB units, can be considered to be hardly perceptible by the human eye (Mahy *et al.* 1994).

Table 3: Adjustment results. RMSE and ΔE_{ab}^* .

Image	Polynomial order	RMSE CIE XYZ			ΔE_{ab}^*
		X	Y	Z	
SDIM0192	1st order	1.925	2.006	1.699	4.28
	2nd Order	1.775	1.840	1.528	3.31
	3rd Order	5.157	5.547	6.297	10.53

In accordance with this last criterion, the optimal fit for the RGB to CIE XYZ transformation is the second order polynomial, where the mean colour difference is less than four CIELAB units (3.3 units). The third order transformation must be rejected due to the high value obtained in the RMSE errors (up to 6.3 in Z) and the ΔE_{ab}^* colour differences (10.5 units).

Once the camera was characterised, we obtained output images in the sRGB space (Fig. 6). We can visually compare the results obtained for the three adjustments applied in a specimen of the original image corresponding to a deer (Fig. 7).



Figure 6: sRGB output image (second order polynomial transformation).

The visual differences between the first and second order with third order transformations are clearly perceived.

The best results were obtained with the second order polynomial, where the mean colour difference was less than four CIELAB units. The pigment is clearly distinguished from the support. The third order polynomial is the one that offers the worst results.

6. Discussion

Given the importance of an accurate colour recording in rock art, it is necessary to perform the digital camera characterisation to register colours as close as possible to understand the true cultural heritage site conditions.

Different methods can be used to characterise digital devices, such as polynomial transformation, principal component analysis or artificial neural networks (Cheung *et al.* 2004; Vrhel and Trussell 1992). However, it is not

usual to find software that simultaneously allows capturing raw RGB data, characterising digital cameras, and specially applying it on images to obtain output sRGB characterised images.

The results obtained in this case study showed that the proposed workflow for digital camera characterisation is adequate and takes into account the most important technical colourimetric aspects. The exposed methodology combines the direct method based on colourimetric measurements, and the indirect method using raw images with RGB information (Westland *et al.* 2012; Martínez-Verdú *et al.* 2003).

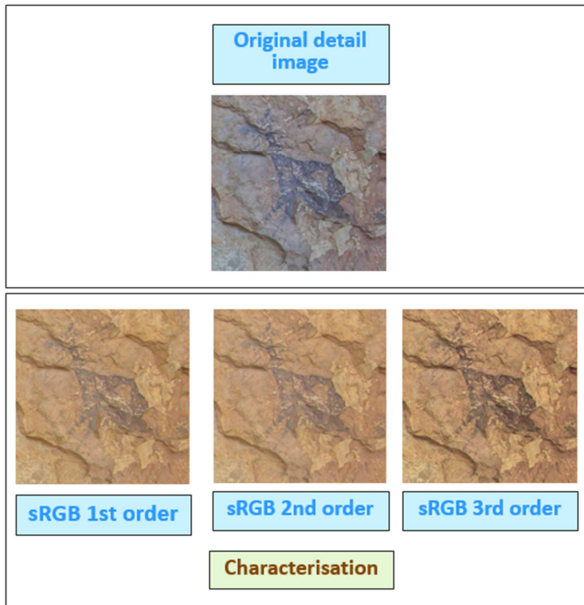


Figure 7: sRGB output images targeting a detail of an animal.

The software developed in this study (pyColourimetry) covers each of the steps required for proper camera characterisation, and gives the user full control on the overall computation process. It also facilitates the data acquisition and measurement tasks as well as processing of colourimetric samples, setting the polynomial parameters, and applying them to finally

obtain the output image in the sRGB space (International Electrotechnical Commission, 1998).

We can calculate the numerical relationships between the RGB device dependent colour space and the standard CIE XYZ colour space. Once transformations parameters are determined a conventional digital camera can be used to determine rigorous object colours simulating a colourimeter.

With a second order polynomial characterisation, users can obtain accurate colour information, regardless the camera or sensor used in the data acquisition from well-defined colourimetric data using the pyColourimetry software.

7. Conclusion

The accurate description of colour is a key aspect in heritage documentation. In recent decades, the use of digital images in heritage documentation with traditional methods has become more frequent. Its use is widely justified since it is a low-cost, non-invasive technique, and a fast method to record data.

In this paper, we showed that camera characterisation process with pyColourimetry software allows the correct colour definition in a non-subjective way, following a low-cost solution for colour communication and dissemination.

The results are satisfactory and very promising for proper colour documentation in archaeological rock art studies. The colour registration in rock art scenes was considered correct, as well as the comparison of sets of pictures acquired under different lighting conditions by means of a physically based sRGB colour space.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the support from the Spanish Ministerio de Economía y Competitividad to the project HAR2014-59873-R. The authors would like also to acknowledge comments from the colleagues at the Photogrammetry & Laser Scanning Research Group (GIFLE).

References

- APOLLONIO, F.I., BALLABENI, M. and GAIANI, M., 2014. Color Enhanced Pipelines for Reality-Based 3D Modeling of on Site Medium Sized Archeological Artifacts. *Virtual Archaeology Review* 5(10): 59–76.
- BALASUBRAMANIAN, R., 2003. *Device Characterization*, In *Digital Color Imaging Handbook*, Chapter 5. CRC Press.
- CLARK, R.N., 1999. Spectroscopy of Rocks and Minerals and Principles of Spectroscopy, in *Manual of Remote Sensing*, Volume 3. Chapter 1. Remote Sensing for the Earth Sciences, (A.N. Rencz, Ed.) John Wiley and Sons, New York, p 3- 58, 1999.
- CHEUNG, V., WESTLAND, S., CONNAH, D. and RIPAMONTI, C., 2004. A Comparative Study of the Characterisation of Colour Cameras by Means of Neural Networks and Polynomial Transforms. *Coloration Technology* 120(1): 19–25. doi:10.1111/j.1478-4408.2004.tb00201.x.
- CIE, 2004. *Colorimetry*. Commission Internationale de l’Eclairage.
- HUNT, G.R., SALISBURY, J.W. and LENHOFF, C.J., 1971. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks. III. Oxides e hydroxides. *Modern Geology*. 2: 195-205.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 1998. Colour Measurement and Management in Multimedia Systems and Equipment - Part 2-1: Default RGB Colour Space - sRGB. IEC/4WD 61966-2-1.

- KORYTKOWSKI, P. and OLEJNIK-KRUGLY, A., 2017. Precise Capture of Colors in Cultural Heritage Digitization. *Color Research & Application* **42**(3): 333–36. doi:10.1002/col.22092.
- MAHY, M., VAN EYCKEN, L. and OOSTERLINCK, A., 1994. Evaluation of Uniform Color Spaces Developed after the Adoption of CIELAB and CIELUV. *Color Research & Application* **19**(2), pp. 105–21. doi:10.1111/j.1520-6378.1994.tb00070.x.
- MALACARA, D., 2002. *Color Vision and Colorimetry: Theory and Applications*. SPIE.
- MARTÍNEZ-VERDÚ, F., PUJOL, J. and CAPILLA, P., 2003. Characterization of a Digital Camera as an Absolute Tristimulus. *Journal of Imaging Science and Technology* **47**(4), pp. 279–95. doi:10.1117/12.474876.
- OHTA, N. and ROBERTSON, A., 2005. *Colorimetry: Fundamentals and Applications*. England: J. Wiley.
- OLIPHANT, T.E., 2007. Python for Scientific Computing. *Computing in Science & Engineering* **9**(3), pp. 10–20. doi:10.1109/MCSE.2007.58.
- PALOMAR-VAZQUEZ, J., BASELGA, S., VIÑALS-BLASCO, M.J., GARCÍA-SALES, C. and SANCHO-ESPINÓS, I., 2017. Application of a Combination of Digital Image Processing and 3D Visualization of Graffiti in Heritage Conservation. *Journal of Archaeological Science: Reports* **12**. Elsevier Ltd, pp. 32–42. doi:10.1016/j.jasrep.2017.01.021.
- RUIZ, J.F., and PEREIRA, J., 2014. The Colours of Rock Art. Analysis of Colour Recording and Communication Systems in Rock Art Research. *Journal of Archaeological Science* **50**(1), pp. 338–49. doi:10.1016/j.jas.2014.06.023.
- SEBASTIÁN, M., PALOMO, M., RINCÓN, J., ORMEÑO S. and VICENT, J.M., 2013. Métodos de documentación, análisis y conservación no invasivos para el arte rupestre postpaleolítico: radiometría de campo e imágenes multispectrales. Ensayos en la cueva del tío Garroso (Alacón, Teruel). Madrid. *Jornadas La Ciencia y el Arte IV. Ciencias y tecnologías aplicadas a la conservación del patrimonio*. Min. de Educación Cultura y Deporte:, pp. 279–287.
- SIGMA CORPORATION, 2010. *The SIGMA SD15 digital single lens reflex camera with Foveon ® full color sensor*. Sigma corporation.
- VAN ROSSUM, G. and DRAKE, F.L., 2010. *The Python Library Reference*. October, 1144 pages.
- VRHEL, M.J. and H.J. TRUSSELL, 1992. Color Correction Using Principal Components. *Color Research & Application* **17**(5). Wiley Subscription Services, Inc., A Wiley Company: 328–38. doi:10.1002/col.5080170507.
- WESTLAND, S., RIPAMONTI, C. and CHEUNG, V., 2012. *Computational Colour Science Using MATLAB®*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. doi:10.1002/9780470710890.

DOCUMENTACIÓN 3D DE LA COVA DELS CAVALLS Y DE SU ENTORNO (TÍRIG, CASTELLÓN)

3D DOCUMENTATION OF THE COVA DELS CAVALLS AND ITS SURROUNDINGS (TÍRIG, CASTELLÓN)

Miriam Cabrelles*, José Luis Lerma

Grupo de Investigación en Fotogrametría y Láser Escáner (GIFLE). Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, Edificio 7i, 46022 Valencia. micablo@doctor.upv.es; jllerma@cgf.upv.es

Abstract:

Archaeological cultural heritage is a precious resource that should be transmitted to future generations. The 3D digital representation of monuments and sites has proven to be a reliable method for this aim. This article shows the geomatics workflow undertaken for the complex rock art documentation of the Cova dels Cavalls (Tírig, Castellón). The paintings are part of the Rock art of the Mediterranean Basin of the Iberian Peninsula declared a UNESCO's World Heritage Site in 1998. The various stages are reviewed, from the acquisition phase up to the delivery of part of the derived metric products, such as 3D models and photorealistic models.

Key words: Geomatics, Rock Art, Photogrammetry, 3D Modelling, Cultural Heritage Documentation, Laser scanning

Resumen:

El patrimonio cultural arqueológico es un bien preciado que debe transmitirse a las generaciones futuras. La representación digital 3D de monumentos y sitios ha demostrado ser un método fiable para ello. El artículo que se presenta muestra el flujo de trabajo geomático desarrollado en las labores de documentación del conjunto de arte rupestre de la Cova dels Cavalls (Tírig, Castellón). Las pinturas forman parte del Arte rupestre del Arco Mediterráneo de la Península Ibérica declarado Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO en 1998. Se revisan las distintas etapas, desde la fase de captura hasta la entrega de parte de los productos métricos derivados, como son los modelos 3D y los modelos fotorrealísticos.

Palabras clave: Geomática, Arte Rupestre, Fotogrametría, Modelización 3D, Documentación Patrimonio Cultural, Láser escáner

1. Introducción

Este artículo presenta la metodología de documentación métrica y los resultados obtenidos hasta el momento en el levantamiento de la Cova dels Cavalls, utilizando técnicas fotogramétricas y de escaneado láser terrestre.

La documentación del arte rupestre tiene una doble finalidad: la de servir de herramienta de investigación y conocimiento, y el de requisito de protección patrimonial que permite el seguimiento de la conservación y facilita el registro físico de un fenómeno sujeto a potencial deterioro o pérdida con el paso del tiempo (Martínez and Villaverde 2002). En el campo de la arqueología de arte rupestre prehistórico, generalmente nos encontramos con pinturas y/o grabados.

Existen diferentes alternativas a la hora de abordar levantamientos complejos (Lerma *et al.* 2010b). La primera opción es la fotogrametría a partir de imágenes como base y el escaneado láser como complemento (Remondino *et al.* 2009). La segunda es el escaneado láser como base y la fotogrametría a partir de imágenes como complemento en zonas concretas. Y la tercera opción es la integración de ambas soluciones (Lerma *et al.* 2011). En levantamientos a gran escala se utilizan

otras alternativas para capturar información geoespacial como son la utilización de medios aéreos ya sea por medio de aerofotogrametría o LiDAR (Remondino *et al.* 2016). Recientemente han aparecido sistemas de cartografiado móvil que pueden montarse en una mochila y ser manejados por un único operador mientras camina a un ritmo natural (Fallon *et al.* 2012; Zlot and Bosse 2014). Soluciones del mismo tipo pero más comerciales, pueden consultarse en GEXCEL (2017), Leica Geosystems (2017) y CSIRO (2015).

En la documentación de la Cova dels Cavalls se optó por utilizar la segunda alternativa, utilizando en primer lugar un escáner láser terrestre para establecer la geometría espacial del conjunto y de su entorno, obteniéndose el modelo 3D de la Cova como base métrica del trabajo. En segundo lugar se realizó una secuencia de fotografías del abrigo para obtener modelos texturizados a alta resolución de los paneles decorados.

La Figura 1 describe el flujo de trabajo seguido en el levantamiento fotogramétrico a diferentes escalas que nos ocupa. En primer lugar aparece la captura de datos con diferentes sensores (láser escáner y cámara), seguido del procesamiento de los mismos con la

* Corresponding Author: Miriam Cabrelles, micablo@doctor.upv.es

finalidad de obtener en cada caso modelos 3D, bien a escala general o de detalle.

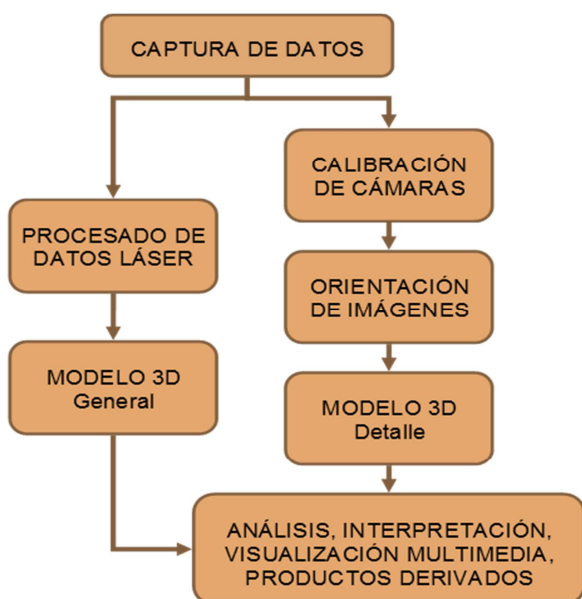


Figura 1: Esquema de un levantamiento fotogramétrico a diferentes escalas.

2. Caso de estudio

Las pinturas rupestres de la Cova dels Cavalls, situada en el Barranc de la Valltorta (Tírig, Castellón), fueron descubiertas en febrero de 1917. Poco después, en 1924, el conjunto fue declarado Monumento Histórico-Artístico. La Cova dels Cavalls cuenta con dos abrigos (Fig. 2). El Abric I de escasa concavidad y reducido número de motivos y el Abric II subdividido en dos cavidades de extensión más o menos equivalente en lo que se refiere a su superficie decorada (Martínez and Villaverde 2002). En la actualidad el conjunto conserva motivos de Arte Esquemático y representaciones de Arte Levantino. Entre las escenas destaca la cacería de ciervos, una de las composiciones más emblemáticas del arte rupestre a nivel mundial (Fig. 3).

La Cova dels Cavalls, de orientación noroeste, se abre en una pared vertical a 67 m sobre el lecho del Barranc

de la Valltorta. Se encuentra ubicada en el margen izquierdo del barranco, junto a la Roca de les Tàbegues (Fig. 4).



Figura 2: Abric II de La Cova dels Cavalls.



Figura 3: Escena principal de la Cova del Cavalls (detalle). Febrero de 2017.



Figura 4: Meandro del Barranc de la Valltorta donde se sitúa la Cova dels Cavalls (febrero de 2017).

3. Captura de datos

Esta parte del trabajo es fundamental en cualquier proceso de documentación, ya que un buen diseño de la toma de datos condiciona la calidad de los resultados obtenidos posteriormente durante la fase de procesamiento (Lerma *et al.* 2008).

La captura de datos se llevó a cabo en febrero de 2017. En primer lugar se tomaron los datos necesarios para el levantamiento de La Cova dels Cavalls a escala 1/15 y de su entorno a escala más general. La instrumentación utilizada fue el láser escáner terrestre FARO Focus^{3D} X 330 (Fig. 5). El alcance máximo de este equipo es de 330 metros. Está diseñado para aplicaciones en exteriores gracias a su poco peso, sus reducidas dimensiones y su GPS integrado (FARO Technologies Inc. 2017). En total, se realizaron 14 escaneados: diez escaneados a resolución 1/2 (3 mm / 10 m) para el levantamiento de la Cova y cuatro escaneados a resolución máxima (1,5 mm / 10 m) para el levantamiento de parte del Barranc de la Valltorta (Figs. 4 y 6). Los estacionamientos del escáner se eligieron para garantizar la máxima cobertura 3D de la Cova.

En segundo lugar, se tomaron imágenes con la cámara Canon EOS-1Ds Mark III con objetivo Canon de 24 mm

y trípode Manfrotto. La cámara tiene formato completo de 35 mm y cuenta con un sensor CMOS de 21 megapíxeles, para más información sobre sus características consultar Canon Europe LTD (2017). Las imágenes se tomaron exclusivamente del Abric II, con la finalidad de obtener un modelo de muy alta resolución que permitiera el estudio de las pinturas en 3D con textura fotográfica.

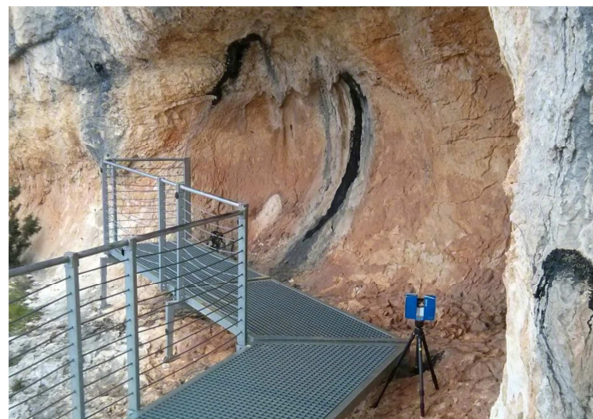


Figura 5: Estacionamiento del láser escáner frente a la Cavity 2 del Abric II de La Cova dels Cavalls.



Figura 6: Imagen panorámica de una nube de datos láser correspondiente a la Cova dels Cavalls y su entorno.

4. Procesamiento de datos láser

El volumen de datos láser crudos ascendió aproximadamente a 678 millones de puntos espaciales (X,Y,Z) junto con sus valores de intensidad (I). La Figura 6 muestra una imagen panorámica de la nube de puntos 3D capturados en un escaneado.

La fase de procesamiento de los datos láser comienza con la transformaron de las nubes de puntos capturadas en los sistemas de referencia instrumentales (locales) a un único sistema de coordenadas objeto XYZ. Esta acción se conoce como registro de las nubes de puntos. Para ello es necesario disponer de al menos cuatro puntos homólogos entre pares de escaneados. La correcta distribución de dichos puntos en el espacio 3D es importantísima a la hora de tener buenos resultados en el ajuste.

Se optó por utilizar el software 3DVEM Register, en lugar del programa FARO Scene, que está desarrollado

e implementado por miembros del Grupo de Investigación en Fotogrametría y Láser Escáner (GIFLE) de la Universitat Politècnica de València. 3DVEM – Register resuelve el registro, la alineación o la orientación relativa (traslación y rotación), de nubes de puntos y/o modelos 3D, a partir de un número suficiente de entidades homólogas identificadas en diversos formatos ASCII. Las entidades homólogas podrán ser centros de dianas y esferas, entre otras, así como puntos naturales o puntos extraídos 3D a partir de modelos digitales o nubes de puntos densas. El emparejamiento de las entidades en el registro es en principio automática, ya que el programa establece las homologías de manera interna, y compensa el registro indirecto mediante mínimos cuadrados o con estimadores robustos, en función de la opción que seleccione el usuario. Para tener más información sobre las posibilidades de dicho software véase Fabado *et al.* (2013), Muñumer and Lerma (2015) y Artese *et al.*

(2014). La Figura 7 muestra la ventana principal del programa 3DVEM – Register.

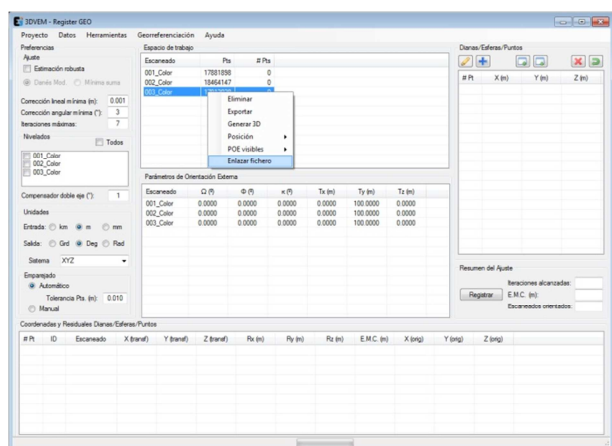


Figura 7: Ventana principal del software 3DVEM Register.

Para poder llevar a cabo el registro de los diferentes escaneados fue necesario determinar a posteriori los puntos homólogos entre los diferentes escaneados. Para ello y debido a la ausencia de esferas o dianas colocadas *in situ* el día del levantamiento se procedió a medir puntos naturales con el software 3DReshaper versión 5.3 (Fig. 8). Es importante reseñar que gracias a tener el escáner brújula y alímetro, y a llevar activado el GPS, los datos crudos aparecían orientados y con altura aproximada sobre el nivel del mar.

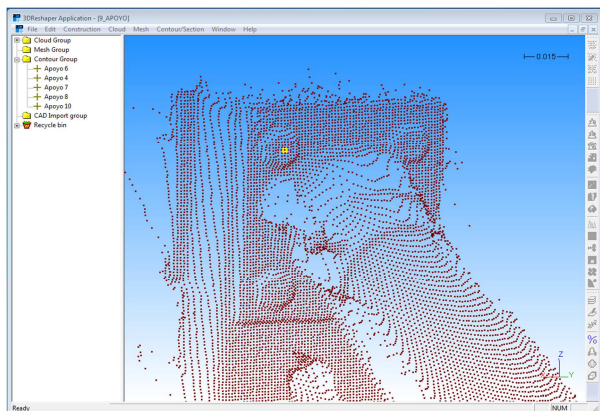


Figura 8: Selección de puntos homólogos con el programa 3DReshaper. En amarillo aparece el punto de la nube de puntos seleccionado.

El siguiente paso consistió en la depuración de los datos. Para ello se filtraron redundancias y se eliminaron elementos ajenos al yacimiento como puede ser la escalera de acceso. Además, se redujo el ruido del escáner con las herramientas de filtrado del software 3DReshaper (TECHNODIGIT 2015).

5. Obtención del modelo 3D a partir de datos láser

A partir de las nubes de puntos registradas y filtradas se obtuvo el modelo tridimensional de la Cova del Cavalls tras un proceso de triangulación 3D. La Figura 9 muestra una vista en perspectiva del modelo 3D generado de la Cova dels Cavalls. El software utilizado fue 3DReshaper.

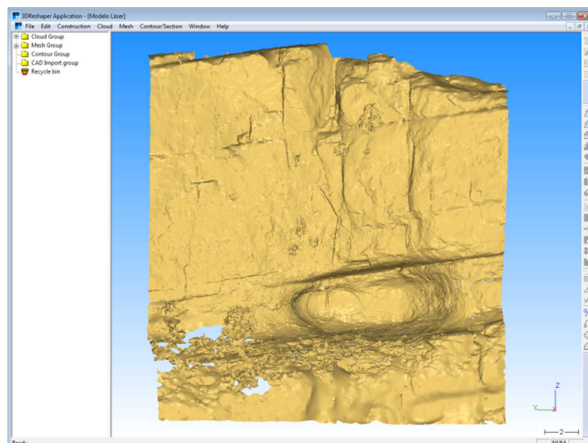


Figura 9: Vista en perspectiva del modelo láser 3D.

6. Calibración de cámaras

La calibración de la cámara ha sido siempre un componente esencial de la medición fotogramétrica. La auto-calibración durante el proyecto es una operación rutinaria pero esencial aplicada en trabajos de precisión de objeto cercano como el que se describe. En cualquier caso, los seis parámetros de orientación exterior que definen la posición espacial y la orientación de la cámara y los parámetros de orientación interior se determinan simultáneamente por medio de un ajuste por mínimos cuadrados de las ecuaciones de colinealidad con parámetros adicionales (Lerma *et al.* 2010a). Según Remondino and Fraser (2006) la calidad de la auto-calibración depende de la geometría global de la red, y especialmente de la configuración de las tomas. Deben tomarse imágenes altamente convergentes, con tomas giradas ortogonalmente y un gran número de puntos objeto bien distribuidos.

Para determinar los parámetros de orientación interna de la cámara se eligieron un total de 35 imágenes convergentes correspondientes a la Cavity 1 del Abric II de la Cova dels Cavalls (Fig. 10). El software utilizado fue Agisoft PhotoScan Professional (versión 1.3.1). Puede consultarse más información sobre dicho software en Agisoft (2017).

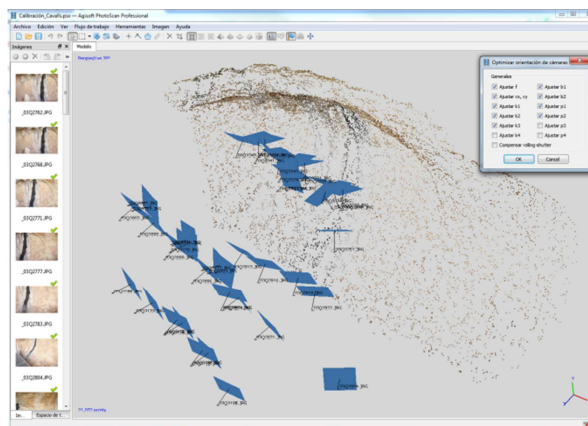


Figura 10: Vista del proyecto de calibración. Visualización de los puntos XYZ utilizados en el ajuste y de la posición espacial de cada imagen.

7. Orientación de las imágenes

Una vez calibrada la cámara se procedió a orientar en el espacio las 200 imágenes tomadas del Abric II. El software utilizado en esta fase fue también Agisoft PhotoScan Professional. Las imágenes se orientaron en bloque para obtener sus parámetros de orientación externa (Fig. 11). Posteriormente se realizó una transformación de semejanza 3D para determinar la orientación absoluta de las imágenes del bloque fotogramétrico respecto a los datos láser. Para ello se identificaron en las imágenes puntos naturales pertenecientes a la nube de datos del láser.

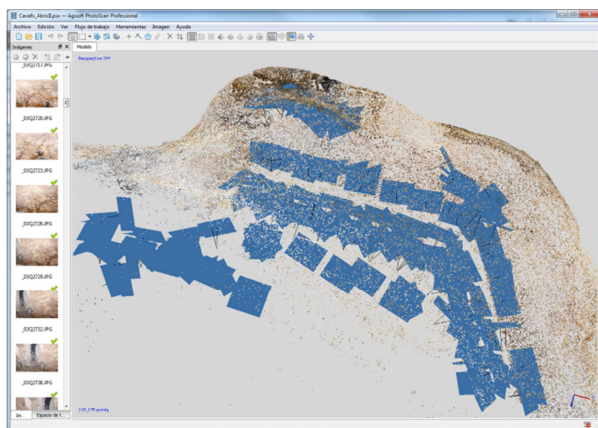


Figura 11: Vista del proyecto de orientación de las imágenes. Visualización de los puntos XYZ utilizados en el ajuste y de la posición espacial de cada cámara.

8. Obtención del modelo 3D a partir de las imágenes

Este proceso es similar al descrito en el epígrafe 5. A partir de la nube de puntos densa obtenida por correlación de imágenes se obtuvo el modelo tridimensional tras un proceso de triangulación 3D. La Figura 12 muestra una vista en perspectiva de la nube de puntos densa generada por el software Agisoft PhotoScan Professional. El software utilizado para generar y depurar el modelo 3D fue 3DReshaper, en lugar de la solución automática que ofrece el programa utilizado con anterioridad. De esta manera se consigue mejorar sustancialmente la calidad del modelo geométrico 3D resultante.

9. Productos derivados

La documentación arqueológica requiere de soluciones efectivas que permitan archivar, visualizar, gestionar, analizar y monitorizar los distintos yacimientos y sitios existentes.

Aparte de la documentación topográfica habitual en base a planimetrías y altimetrías, pueden derivarse productos métricos como son los modelos 3D, los modelos fotorrealísticos (Fig.13) y los ortofotomosaicos con niveles de detalle y precisiones variables de acuerdo a las distintas aplicaciones (visores web, realidad virtual, etc.).

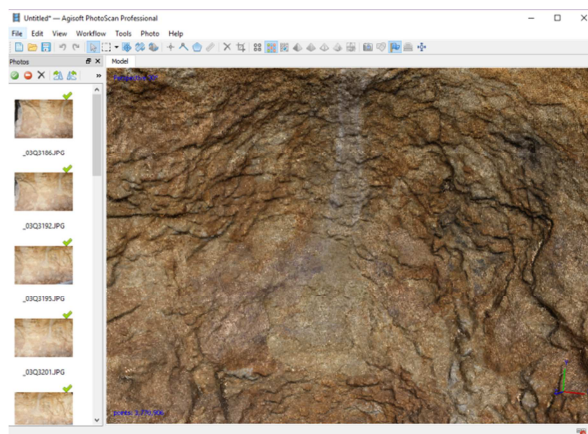


Figura 12: Vista en perspectiva de la nube de puntos densa (detalle).

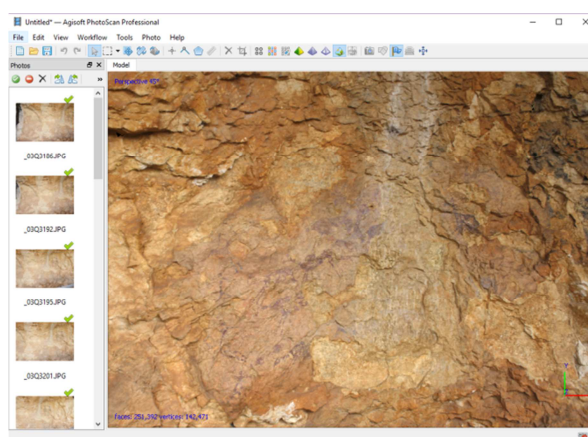


Figura 13: Vista en perspectiva del modelo texturizado (detalle).

10. Conclusiones

Los objetivos iniciales del proyecto son la documentación minuciosa del conjunto arqueológico de la Cova dels Cavalls (Tírig, Castellón), y de su entorno, implementando una metodología de documentación métrica con base fotogramétrica. Este artículo presenta de manera resumida parte de los trabajos de documentación realizados hasta el momento. Los resultados satisfactorios alcanzados se deben a la integración eficiente de las soluciones fotogramétricas a partir de imágenes digitales y del escaneado láser efectuado.

En un futuro se pretende documentar métricamente y validar el conjunto de la Cova con diferentes niveles de detalle y de precisión, integrando soluciones efectivas, por desgracia no siempre automáticas, en todas las etapas del proceso productivo.

Agradecimientos

Los resultados presentados se enmarcan dentro del proyecto de investigación HAR2014-59873-R del Ministerio de Economía y Competitividad. Los autores agradecen a Diego Mosquera de FARO Spain su contribución al facilitar el escáner.

References

- AGISOFT 2017. Agisoft: Features Professional Edition. Available: <http://www.agisoft.com/features/professional-edition/> [6/8, 2017].
- ARTESE, S., ALTOMARE, C., LERMA, J.L., and ZINNO, R., 2014. Terrestrial laser scanning registration analysis and its effects on a masterpiece dome. In *3D/4D Documentation in Cultural Heritage*, International Conference On Cultural Heritage EuroMed: pp. 89-99.
- CANON EUROPE LTD 2002-2017. EOS-1Ds Mark III: the professional workhorse. Available: <http://cpn.canon-europe.com/content/product/cameras/eos1dsmark3.do> [6/8, 2017].
- CSIRO, 2015-2017. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation. Zebedee: handheld laser scanner. Available: <https://www.data61.csiro.au/en/Our-expertise/Expertise-Cyber-physical-systems/Zebedee> [5/21, 2017].
- FABADO, S., SEGUÍ, A.E., CABRELLES, M., NAVARRO, S., GARCÍA-DE-SAN-MIGUEL, D. and LERMA, J.L., 2013. 3DVEM software modules for efficient management of point clouds and photorealistic 3D models. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-5/W2, 2013 XXIV International CIPA Symposium, 2 – 6 September 2013, Strasbourg, France. ISSN 1682-1777. pp. 255 – 260.
- FALLON, M.F., JOHANNSSON, H., BROOKSHIRE, J., TELLER, S. and LEONARD, J.J., 2012. Sensor fusion for flexible human-portable building-scale mapping. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vilamoura, pp. 4405-4412. doi: 10.1109/IROS.2012.6385882.
- FARO TECHNOLOGIES INC., 2017. FARO Focus Laser Scanner S, M & X Series - Perfect instruments for 3D Documentation and Surveying. Available: <http://www.faro.com/es-es/productos/topografia-3d/laser-scanner-faro-focus-3d/caracteristicas> [6/8, 2017].
- GEXCEL, 2017. HERON wearable laser scanner. Available: <http://www.gexcel.it/en/heron-overview> [5/21, 2017].
- LEICA GEOSYSTEMS AG - PART OF HEXAGON, 2017. Leica Pegasus: Backpack Wearable Mobile Mapping Solution. Available: <http://leica-geosystems.com/products/mobile-sensor-platforms/capture-platforms/leica-pegasus-backpack> [5/21, 2017].
- LERMA GARCÍA, J.L., SANTANA QUINTERO, M., HEINE, E., and GENECHTEN, B. VAN., 2008. Theory and practice on terrestrial laser scanning. Training material bases on practical applications. (J.L. Lerma García, M. Santana Quintero, E. Heine, & B. Van Genechten, Eds.). Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València.
- LERMA, J.L., NAVARRO, S., CABRELLES, M. and SEGUI, A.E., 2010a. Camera Calibration with Baseline Distance Constraints. *The Photogrammetric Record* **25**(130), pp. 140-158. DOI: 10.1111/j.1477-9730.2010.00579.x.
- LERMA, J.L., NAVARRO, S., CABRELLES, M. and VILLAVERDE, V., 2010b. Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the upper Palaeolithic cave of Parpallò as a case of study. *Journal of Archaeological Science*, **37**(3), pp. 499-507.
- LERMA, J.L., NAVARRO, S., CABRELLES, M., SEGUÍ, A.E., HADDAD, N. and AKASHEH, T., 2011. Integration of laser scanning and imagery for photorealistic 3D architectural documentation. In: *Laser Scanning, Theory and Applications* (Chau-Chang Wang, Ed.). Intech, pp. 414-430.
- MARTÍNEZ VALLE, R. and VILLAVERDE BONILLA, V., 2002: *La Cova dels Cavalls en el barranc de la Valltorta*. Monografías del Instituto de Arte Rupestre. Museu de la Valltorta. Tírig. Publisher: Generalitat Valenciana, Editor: R. Martínez Valle & Valentín Villaverde, ISBN: 84-482-3333-6. 210 pages.
- MUÑUMER, E. and LERMA, J.L., 2015. Fusion of 3D Data from Different Image-based and Range-based Sources for Efficient Heritage Recording. *International Congress on Digital Heritage - Theme 1 - Digitization And Acquisition*, <http://dx.doi.org/10.1109/DigitalHeritage.2015.7413840>.
- REMONDINO, F. and FRASER, C., 2006. Digital camera calibration methods: considerations and comparisons. In: H.-G. Maas and D. Schneider (H.-G. Maas and D. Schneider, ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology', Dresden, Germany, 25-27 September, pp. 266-272.
- REMONDINO, F., GIRARDI, S., RIZZI, A. and GONZO, L., 2009. 3D modeling of complex and detailed cultural heritage using multi-resolution data. *ACM Journal on Computing and Cultural Heritage*, **2**(1), 1-20.
- REMONDINO, F., GAIANI, M., APOLLONIO, F., BALLABENI, A., BALLABENI, M. and MORABITO, D., 2016. 3D documentation of 40 kilometers of historical porticoes – The challenge. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLI-B5, 2016 XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic.
- TECHNODIGIT PART OF HEXAGON, 2015. 3DReshaper, One Software, Infinite Applications. Available: <http://www.3dreshaper.com/en/> [6/8, 2017].
- ZLOT, R. and BOSSE, M., 2014. Three-dimensional mobile mapping of caves. *Journal of Cave and Karst Studies*, v. **76**, no. 3, pp. 191–206. DOI: 10.4311/2012EX0287.

DISEÑO DE ESTRATEGIAS DE CROWDSOURCING EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA VOLUNTARIA

CROWDSOURCING STRATEGIES DESIGN IN VOLUNTEERED GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS

José-Pablo Gómez-Barrón*, Miguel-Ángel Manso-Callejo, Ramón Alcarria

E.T.S.I. en Topografía, Geodesia y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, Km 7.5 de la Autovía de Valencia (Campus Sur), 28031, Madrid, España. josepablo.gomezbarron@upm.es; m.manso@upm.es; ramon.alcarria@upm.es

Abstract:

This work addresses voluntary geographic information (VGI) as an information system that facilitates organizations to achieve specific goals by outsourcing processes and activities to an online community. A definition of a voluntary geographic information system (VGIS) is proposed, identifying its core components (Project, Participants, Technology), then, crowdsourcing, the most relevant process for managing information within these type of systems, is analysed. We analyse several types of crowdsourcing models in the context of VGIS, and it is proposed a classification built around the different ways of organizing a community, which include different levels of participation according to the use of three processes: contributory, collaborative and participatory. Based on the study of the different typologies intrinsically linked to the existing levels of involvement and engagement, and the use of participants' cognitive skills, a continuum of participation is identified, presenting two opposite tendencies when designing VGI projects: crowd-based and community-driven, the latter with higher levels of collaboration or even co-creation. Based on the above, it is proposed a set of criteria for the design of the crowdsourcing strategy of a VGIS, as a roadmap that directs the project. This design and planning tool helps to characterize and define in a simple way the general requirements of the processes and activities of a VGIS that will be implemented through a crowdsourcing task, being the first step in the interdependent design of the project, participation and technological components. The design of subsequent strategies related to the other components of the system must be aligned and linked to the crowdsourcing strategy, and altogether will guide the development of tasks, functionalities and the specific technological tools of the system.

Key words: Volunteered Geographical Information, Crowdsourcing, Information Systems, Participation, Community

Resumen:

Este trabajo de investigación aborda la información geográfica voluntaria (IGV) como un sistema de información que facilita a las organizaciones el logro de objetivos específicos mediante la externalización de procesos y actividades a una comunidad en línea. En él se propone una definición de sistema de información geográfica voluntaria (SIGV), se identifican sus componentes centrales (Proyecto, Participantes, Tecnología), y se analiza el proceso de gestión de la información más relevante en este tipo de sistemas: el crowdsourcing. Se analizan varios tipos de modelos de crowdsourcing en el contexto de los SIGV, para luego proponer una clasificación basada en los diferentes modos de organizar a una comunidad; éstos incluyen distintos niveles de participación según el uso de tres procesos: contributivo, colaborativo y participativo. En base al estudio de las diferentes tipologías vinculadas intrínsecamente a los niveles de implicación y compromiso existentes, y al uso de las habilidades cognitivas de los participantes, se identifica un continuo de participación, presentándose dos tendencias opuestas al diseñar proyectos de IGV: los basados en la crowd («la multitud»), y los impulsados por una comunidad con mayor nivel de colaboración o hasta la co-creación. Basado en lo anterior, se propone un conjunto de criterios para el diseño de la estrategia de crowdsourcing de un SIGV, para dirigir un proyecto. Esta herramienta de diseño y planificación ayuda a caracterizar y definir de un modo simple los requerimientos generales de los procesos y actividades de un SIGV. Estos serán implementados mediante una tarea de crowdsourcing, siendo el primer paso en el diseño interdependiente del proyecto, la participación y el componente tecnológico. Las estrategias a diseñar de los demás componentes del sistema se deben alinear y vincular con la estrategia de crowdsourcing, y en su conjunto guiarán el desarrollo de las tareas, funcionalidades y herramientas tecnológicas concretas del sistema.

Palabras clave: Información Geográfica Voluntaria, Crowdsourcing, Sistemas de Información, Participación, Comunidad

1. Introducción

Los avances en las tecnologías de la información (TI), particularmente el desarrollo de la Web 2.0 y la computación social centrada en las personas, han transformado Internet en una plataforma interactiva y

abierta que permite la participación directa de los usuarios en la generación, manejo e intercambio de información. La Web 2.0 ha creado nuevos canales para que los usuarios en Internet no sólo actúen como consumidores pasivos de información, sino también como productores, convirtiéndose en «prosumers»

* Corresponding Author: José-Pablo Gómez-Barrón, josepablo.gomezbarron@upm.es

(Toffler 1980) o «*producers*» (Bruns 2006), términos traducidos como «prosumidores» y «produsuarios», con un doble rol (consumidor/productor) y cuya información generalmente se denomina como «contenido generado por el usuario». Las características de interactividad, apertura, interoperabilidad y la arquitectura orientada a servicios de la Web 2.0 (O'Reilly 2005), junto a las tecnologías que ofrecen mapas digitales dinámicos, servicios web de carácter geográfico y basados en la localización, han dado lugar al desarrollo de la Geoweb o web geoespacial (Maguire 2006; Scharl 2007). En la Geoweb, Internet se utiliza para la publicación e intercambio de información geográfica (IG) y mapas (Haklay *et al.* 2008), y actúa como una plataforma colectiva para producir, analizar y compartir datos georreferenciados. Así, gracias a la Geoweb junto con el desarrollo y uso de los sistemas de posicionamiento por satélite, receptores GNSS (del inglés, *Global Navigation Satellite Systems*) y otros sensores implementados en los dispositivos móviles, imágenes de satélite, algoritmos de geocodificación y *geo-tagging*, entre otras herramientas que facilitan la vinculación de datos a una ubicación (localización geográfica o lugar particular), la generación de contenido geográfico en la Web por usuarios no necesariamente profesionales es cada vez mayor en la actualidad.

El panorama anterior ha reconfigurado las líneas tradicionales de demanda y oferta, así como el número de actores involucrados, en donde la sociedad en general está haciendo un uso más amplio y abierto de la geoinformación, cuando tradicionalmente estaba restringido a los sectores públicos y privados mediante la implementación de sistemas de información geográfica (SIG). Esta manipulación de la IG basada en la Web y centrada en las personas ha sido descrita por conceptos tales como «*Wikification of GIS*» (Sui 2008), «Mapas 2.0» (Crampton 2009) y «Neogeografía» (Turner 2006), los cuales enfatizan un nuevo paradigma de interacción entre las personas, la geografía y la creación de mapas mediante el uso diario de tecnologías geoespaciales, y las técnicas y herramientas de la Web 2.0 para descubrir, consumir, crear y compartir información, de forma más cercana a intereses individuales, incluyendo percepciones y experiencias locales propias. Sin embargo, probablemente el término que se utiliza con mayor frecuencia es el de **información geográfica voluntaria** (IGV). Este término focaliza en la producción de geoinformación por individuos en la Web como un caso especial de contenido generado por el usuario (Goodchild 2007a). La IGV es creada por un gran número de voluntarios generalmente no profesionales y cuya temática o dominio cubre una muy variada gama de tipos de datos valiosos en los que el espacio y el tiempo son a veces sus únicos unificadores contextuales (Elwood 2008b; Goodchild 2007b; Elwood 2008a). Esto último, presenta la oportunidad para la convergencia de los datos y de las diferentes contribuciones mediante la implementación de sistemas de información orientados a la consecución de objetivos organizacionales específicos. La IGV como actividad organizada con un propósito común, y llevada a cabo mediante un proceso consensuado que hace posible la agregación de los datos dispersos proporcionados por una comunidad en línea, utiliza el modelo conocido como **crowdsourcing**. Este modelo, basado en una convocatoria abierta, se emplea por las organizaciones para diseñar un proceso

que externaliza la realización de una tarea a una red amplia e indefinida de individuos («la multitud» o *crowd*) mediante el uso de un sistema web (Howe 2006). En general, el *crowdsourcing* se utiliza en la adquisición de datos, procesamiento de información, generación de conocimiento, ideas y la resolución de problemas por medio de la participación abierta distribuida. La infraestructura de participación facilitada por este proceso permite a las organizaciones emplear la inteligencia y actividad colectiva de los voluntarios que optan por participar, involucrando y cooperando así con una comunidad para el logro de un objetivo organizacional, mientras que se le otorga a cambio algún tipo de beneficio. En este sentido, la IGV puede ser considerada como la IG que se ha obtenido por medio de un proceso de *crowdsourcing*, proporcionada por un amplio rango de participantes con diferentes niveles de educación, conocimientos y habilidades (Haklay *et al.* 2014).

Este artículo pretende analizar y describir los componentes involucrados en los sistemas socio-tecnológicos que facilitan la tarea de producción y gestión de información geográfica voluntaria, teniendo como objetivo principal el proponer un conjunto de criterios para el diseño de las estrategias de *crowdsourcing* utilizadas en este tipo de sistemas. En la siguiente Sección 2, se aborda el estudio de la IGV como un sistema de información, y se propone una definición. En la Sección 3, se analiza el proceso de *crowdsourcing* y se propone una guía para el diseño de la estrategia a seguir, al planificar un proyecto de IGV. Finalmente, en la Sección 4, se concluyen algunas implicaciones generales en el diseño de sistemas de IGV.

2. Sistemas de Información Geográfica Voluntaria

Las iniciativas cuya meta es la producción o gestión de geoinformación mediante una comunidad de voluntarios, presentan varios elementos interdependientes que hacen necesario su estudio desde una perspectiva o enfoque sistémico. Esto ayuda a entender las partes de un entorno que conduce a la creación de diferentes productos o servicios de información, al igual que facilita su análisis y diseño. Como Fast and Rinner (2014) destacan, la mayoría de las investigaciones analizan las implicaciones de la IGV como un producto o conjunto de datos finales (calidad, fiabilidad, ámbitos de aplicación, etc.), sin identificar claramente los componentes y procesos existentes que influyen en su producción; y por lo tanto en la capacidad de lograr los objetivos de una organización que lleva a cabo un proyecto de IGV. En general, un sistema es un conjunto de elementos o componentes interrelacionados que trabajan conjuntamente para alcanzar un objetivo común. En este sentido, las organizaciones implementan distintos sistemas, entre los cuales se utilizan los sistemas de información (SI) como un recurso que facilita sus actividades y tareas de operación y gestión. Alter (2008), apoyándose en el concepto más general de sistema de trabajo, define sistema de información como un sistema en el cual participantes humanos y/o máquinas realizan un trabajo (procesos y actividades) utilizando información, tecnología y otros recursos para producir productos y/o servicios de información para

clientes (personas que reciben y utilizan lo que el sistema produce) internos o externos. Las actividades y procesos que se realizan en dichos sistemas son dedicadas al procesamiento de información, lo cual implica un conjunto de procedimientos para la captura, transmisión, almacenamiento, recuperación, manipulación y visualización de la información (Alter 2008; Avison *et al.* 1990). Siguiendo la definición anterior se pueden identificar los componentes centrales de los SI, como: **procesos y actividades, participantes** (humanos), **información** (datos), y **tecnología**. También, los sistemas tienen una frontera claramente definida y existen como componentes o subsistemas de otros sistemas (existiendo vinculación entre ellos), es decir su **entorno**; siendo en este caso de manera inmediata la organización que planifica, diseña, desarrolla e implementa el sistema, incluyendo su visión, misión, normas, valores (cultura) y demás actividades y aspectos organizacionales que guían e influyen el rendimiento del sistema y el logro de sus objetivos. La organización muchas veces implementa un SI mediante la definición y ejecución de un proyecto, utiliza la **infraestructura** de que dispone (recursos humanos, informacionales y técnicos; como los equipos de trabajo y su «*know-how*», bases de datos y redes, etc.), y diseña las **estrategias** (opciones, decisiones, lógica y justificación detrás del cómo proceder) que guían el funcionamiento y operación general del sistema.

Construyendo sobre la definición de Alter (2008), en el contexto de una organización, definimos a los **sistemas de información geográfica voluntaria** (SIGV) como un caso especial de SI para producir productos y/o servicios de información para clientes (usuarios y «produsuarios») internos o externos mediante un proceso de *crowdsourcing*, aprovechando el potencial de una comunidad en línea (*crowd* o red distribuida de voluntarios). La comunidad en línea en este caso participa ejecutando una tarea particular de manera distribuida. Así, el trabajo central en los SIGV es realizado por la comunidad, esto quiere decir que, los procesos y actividades en estos sistemas dependen de las contribuciones de los participantes para transformar y procesar información existente y/o producir nueva información o conocimientos con un atributo geoespacial. El definir y caracterizar a los SIGV ayuda a tener un mayor entendimiento de sus componentes y atributos principales, así como sus interacciones. Esto finalmente facilita su diseño y operación de forma ordenada y sistemática. Buscando simplificar el estudio, diseño e implementación de los SIGV, es posible definir como sus componentes principales, los siguientes tres elementos: **Proyecto** (organización), **Participantes** (voluntarios) y **Tecnología**. El proyecto implementado por la organización, incluye la definición de objetivos y la implementación de la estrategia de *crowdsourcing* más eficiente para su consecución. La estrategia de *crowdsourcing*, al ser el proceso principal del sistema, va a determinar el nivel de participación, la arquitectura de cooperación, y las características de los datos y contribuciones (información) requeridas, así como los requisitos y el uso de la tecnología que de soporte y facilite la participación y la implementación del sistema en general. Por lo tanto, el modelo de *crowdsourcing* desempeña un papel importante y central en el diseño y desarrollo de los SIGV, al ser un proceso que funciona como infraestructura de enlace para vincular los objetivos del proyecto y el propósito de la organización,

la estructura de participación y el uso o desarrollo de diferentes herramientas tecnológicas. Actúa como una interface central para gestionar las entradas del sistema, procesar y obtener las salidas, y dirigir su funcionamiento y desempeño de forma global. En la siguiente sección se presenta un breve análisis del modelo de *crowdsourcing* en el contexto de los SIGV, y se introducen una serie de criterios o directrices para el diseño general de las posibles estrategias a seguir.

3. Directrices para el Diseño de Estrategias de Crowdsourcing en SIGV

Como se señaló en la sección anterior, con el apoyo de los sistemas de información geográfica voluntaria, las organizaciones (compañías o firmas, entidades sin ánimo de lucro, comunidades o iniciativas ciudadanas auto-organizadas, agencias del gobierno, instituciones académicas y de investigación, iniciativas de ciencia ciudadana, etc.), desarrollan e implementan productos y/o servicios de información que responden a la identificación de un área de oportunidad o problema que resolver mediante el trabajo organizado de una comunidad (principalmente *online*, aunque muchas veces híbrida: *online/offline*). El proceso y las tareas de *crowdsourcing*, relacionadas generalmente con la recolección, procesamiento y distribución de datos e información geográfica, así como las actividades de adquisición y gestión de conocimiento espacial y la resolución (espacial) de problemas, responden a la definición de objetivos concretos que tienen el fin último de generar algún tipo de valor. Los objetivos de un proyecto de IGV pueden incluir desde la obtención de datos de forma pasiva o contribuciones puntuales para la actualización de bases de datos, la mejora de productos o servicios de los sectores públicos y privados; pasando por actividades más activas y colaborativas como el mapeo en crisis para emergencias y respuesta humanitaria, o la investigación siguiendo un enfoque de ciencia ciudadana; hasta actividades totalmente participativas como la planificación territorial de una comunidad mediante la propuesta de ideas y soluciones creativas puestas en común entre todos los participantes. Dependiendo de los objetivos particulares, las contribuciones tienden a ser más homogéneas o heterogéneas; pasivas o activas; realizadas de forma individual y en muchas ocasiones aisladas e independientes de las contribuciones de otros voluntarios, o basadas en una participación más colaborativa que puede llevar a la creación de un valor emergente y dependiente de las demás contribuciones. Lo anterior involucra diferentes niveles de compromiso e implicación, grados de interacción entre voluntarios, complejidad de las contribuciones y diferente grado de esfuerzo para realización de una tarea.

El propósito general de la organización, el porqué del proyecto y su objetivo claramente definido (visión), determinan el cómo dirigir al proyecto (estrategia), condicionando la planificación y diseño de las estrategias de *crowdsourcing* potenciales, al igual que las estrategias para atraer, fomentar y facilitar la participación como principal condicionante de éxito. A su vez, estas estrategias definirán el qué hacer (producto), es decir, qué tareas, funcionalidades, herramientas tecnológicas, etc. concretas se van a diseñar e

implementar para probar la utilidad de las estrategias. Esto hace necesario la experimentación, adaptación y rediseño iterativo del producto, y del proyecto y sistema en su totalidad. En la siguiente subsección, con el objetivo de avanzar hacia la planificación y diseño de estrategias, se introducen diferentes enfoques generales de *crowdsourcing* que nos ayudan a establecer la dirección a seguir al planificar un proyecto de IGV.

3.1. Modelos de crowdsourcing para la planificación de estrategias en proyectos de IGV

El modelo de *crowdsourcing* se basa en un proceso que consiste en la obtención de recursos dispersos en una comunidad, y la agregación y asimilación de sus contribuciones utilizando herramientas web. El proceso se lleva a cabo mediante el diseño de una o varias tareas que implican el uso de las habilidades cognitivas y perceptivas de un grupo distribuido de voluntarios, participando en actividades de gestión de información y conocimiento, la resolución de problemas o generación de ideas. Brabham (2013) propone la siguiente tipología basada en los diferentes problemas para los que un determinado método de *crowdsourcing* es más adecuado para su resolución, identificando cuatro tipos distintos: 1. «*Knowledge Discovery and Management*» («Búsqueda de información y gestión de conocimiento»): Consiste en encontrar y reunir datos, información y conocimiento disperso, de una manera coherente y en un formato común; un ejemplo puede ser el realizar un reporte sobre un accidente de tráfico. 2. «*Distributed Human Intelligence Tasking*» («Tareas distribuidas basadas en la inteligencia humana»): Adecuado para el procesamiento y análisis de información; por ejemplo, el identificar un elemento en una imagen de satélite. 3. «*Broadcast Search*» («Difusión de problemas para su resolución»): ideal para investigar o resolver problemas con soluciones comprobables empíricamente; por ejemplo, un problema científico. 4. «*Peer-Vetted Creative Production*» («Producción de soluciones creativas en base al examen colectivo»): Usado para generar y seleccionar soluciones e ideas creativas o innovadoras; por ejemplo, el diseño participativo de una zona pública. Esta clasificación, nos lleva a identificar diferencias en cuanto a la dificultad de las tareas y la implicación intelectual requerida para resolver un problema, siendo más demandante a medida que nos acercamos al último método. Este último punto también se puede identificar en el análisis realizado por Haklay (2013) sobre *crowdsourcing* y ciencia ciudadana (geográfica) en el contexto de los proyectos de IGV. En dicho trabajo se presenta una tipología basada en cuatro niveles de participación, en los cuales el uso de las habilidades cognitivas de los voluntarios se puede considerar una variable principal. En el primer nivel propuesto, identificado simplemente como «*Crowdsourcing*», las exigencias cognitivas son pocas o mínimas, y se centra en la perspectiva de «*citizens as a sensors*» («ciudadanos como sensores humanos»), así como en el uso de «*volunteering computing*» o la «computación (distribuida) voluntaria». El segundo nivel, nombrado como «*Distributed Intelligence*» («Inteligencia Distribuida»), se asocia con el concepto de «*volunteered thinking*» o «pensamiento distribuido voluntario», e implica a los ciudadanos como intérpretes básicos de

información siendo las habilidades cognitivas de los participantes el principal recurso del que se hace uso. El siguiente nivel se describe con el término «*Participatory Science*» («Ciencia Participativa») y está relacionado con la ciencia ciudadana o ciencia comunitaria, se requiere un compromiso y uso de las habilidades cognitivas de los participantes todavía mayor, para colaborar junto con científicos en la definición del problema, los métodos de recolección de datos y apoyar en el análisis a los científicos profesionales. Finalmente, se llega el término «*Extreme Citizen Science*» («Ciencia Ciudadana Extrema»), en este último nivel se presenta una actividad completamente participativa, desde la definición del problema, los métodos de recolección y la adquisición de datos, hasta el procesamiento de información y generación de conocimiento (incluyendo la divulgación científica) en la que tanto científicos profesionales como no profesionales tienen el papel de expertos; abriéndose también la posibilidad de hacer trabajo comunitario totalmente integrado sin la necesidad de involucrar profesionales. A medida que avanzamos en esta tipología, los proyectos requieren mayores niveles de participación, compromiso e implicación, así como pueden ir aumentando el uso de las capacidades cognitivas de los voluntarios. También, los niveles de control compartido para dirigir un proyecto, entre los iniciadores y la comunidad van adquiriendo diferentes configuraciones, apareciendo diferentes niveles de autonomía de los participantes, hasta el grado de presentarse un proyecto con casi total dependencia en una comunidad bien organizada e interdependiente para su éxito. De forma general, los proyectos que se enfocan exclusivamente en la recolección de datos, requieren menos implicación cognitiva y menor o nula colaboración entre los voluntarios, particularmente cuando estos proyectos dependen de *crowdsourcing* pasivo que se beneficia de los recursos tecnológicos de los dispositivos móviles digitales sin necesidad o poca intervención humana. Por el contrario, los proyectos basados en la interacción de la comunidad, por ejemplo, con el objetivo de generar conocimientos o ideas, presentan mayores niveles de colaboración y requieren mayor uso de habilidades cognitivas, las cuales son necesarias para analizar e interpretar datos y generar conocimiento y soluciones basadas en información. Estos últimos, también dependen y necesitan de la existencia de entornos más colaborativos.

En términos generales, proponemos diferenciar a los métodos de *crowdsourcing* en el contexto de los SIGV mediante su clasificación en distintos modos de organizar a la comunidad de participantes. Estos modos de organización de la comunidad se diferencian en que la participación puede seguir un proceso contributivo, colaborativo o participativo; los cuales difieren en el nivel de implicación y compromiso de los voluntarios, correspondiéndose también con un conjunto de diferentes motivos para participar. La distinción propuesta puede ser modelada como un continuo desde contribuciones relativamente pasivas, hacia cada vez mayores niveles de contribución activa, hasta llegar a contribuciones que necesiten de acciones proactivas. En el primer extremo del continuo se localizan los proyectos de carácter contributivo con una participación más básica sin mucha complejidad, principalmente autónoma donde las actividades se realizan de forma independiente al trabajo de otros voluntarios. Después,

para obtener contribuciones más complejas se requiere fomentar la comunicación y las relaciones dentro del grupo de participantes, y que, de esta manera, un proyecto empiece a operar de forma más colaborativa. Finalmente, en el otro extremo, el nivel más activo de compromiso e implicación es mediante proyectos que propician procesos participativos, permitiendo a sus participantes el estar totalmente involucrados en la decisión sobre cómo se llevará a cabo el proyecto y hasta en definir o redefinir los resultados requeridos o esperados, al tener un mayor peso las necesidades de información y objetivos buscados por la comunidad. Todos los métodos de *crowdsourcing* se basan en la contribución de una comunidad, pero no todos necesariamente requieren la colaboración o la implementación de un proceso participativo. En la Figura 1 se ilustran los tres niveles principales propuestos y sus procesos o **modos de organización** relacionados: **contributivo** (participación no-colaborativa), **colaborativo** (colaboración) y **proceso participativo** (co-creación).

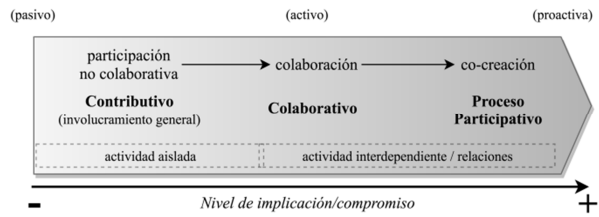


Figura 1: Niveles de participación y sus modos de organización.

En la Figura 2, se muestran como una referencia aproximada, algunos ejemplos de proyectos de IGV y su nivel de participación en relación al modo de organización. No considera un rango operacional totalmente definido en el cual se podría observar como algunos proyectos presentan varios modos de operar según diferentes actividades o momentos, sólo se ubica de forma puntual al proyecto dentro del nivel de participación más predominante para cada caso.

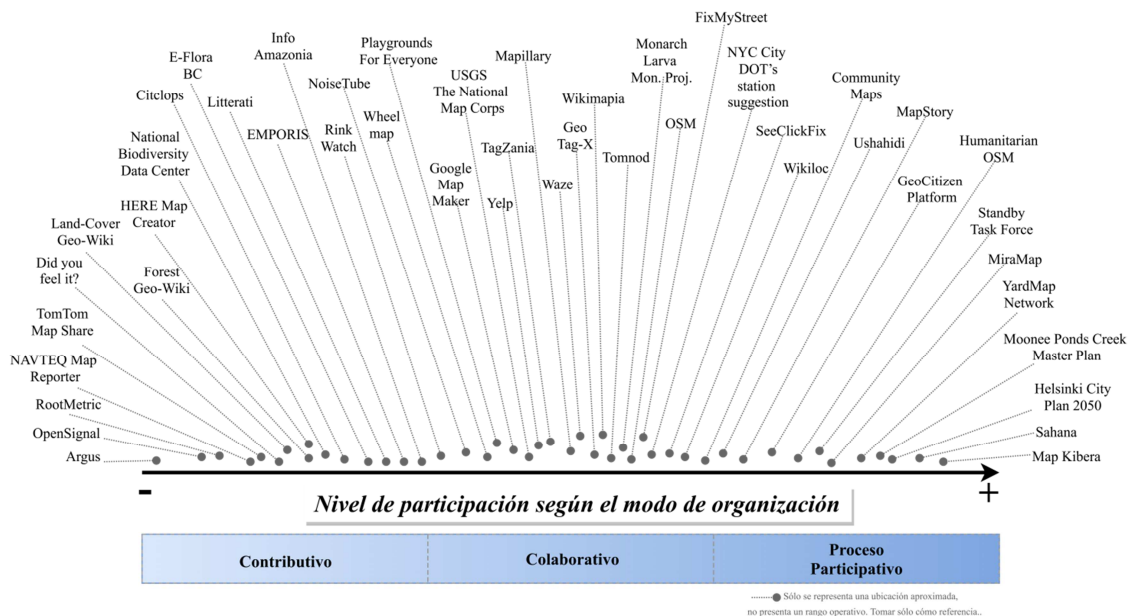


Figura 2: Proyectos IGV y su nivel de participación aproximado.

A medida que se pasa de una implicación pasiva hacia una más activa, los niveles de participación conllevan un grado creciente de interacción entre los participantes, así como con la organización (iniciadores) que gestiona el proyecto. También, niveles crecientes de colaboración hacen posible construir tareas más complejas y exigentes, por lo tanto, cuando se diseña la tarea a realizar por la comunidad es necesario considerar esta clasificación. Las tipologías introducidas anteriormente son útiles para planificar y diseñar las diferentes estrategias de *crowdsourcing* que se pueden utilizar por un SIGV según las características particulares del proyecto, considerándose desde el tipo de problema a resolver, el uso de las capacidades cognitivas, hasta los diferentes modos operativos de organizar a una comunidad. Se puede observar que estas tres clasificaciones de los métodos de *crowdsourcing* tienen puntos de inicio y finalización comunes: el primero cercano a métodos más basados en la *crowd* (red de individuos independientes); el segundo hacia métodos basados o manejados por la comunidad.

3.2. Tendencias de la participación en los proyectos de IGV: crowd vs. comunidad

Tras analizar las diferentes clasificaciones de *crowdsourcing* descritas, se encontró que las estrategias a seguir por un proyecto de IGV, pueden utilizar, o bien un proceso de *crowdsourcing* que tienda hacia una participación basada en la *crowd* con mayor control del proyecto por la organización, o por el contrario, una participación basada en una comunidad con mayor autonomía; al igual que pueden presentar una combinación de ambos, o que varíe en el tiempo según las diferentes etapas de un proyecto. Estas estrategias opuestas, difieren en sus características y dinámicas de participación, y demandan diferentes razones, lógica o motivos por los que los voluntarios se involucran en un proyecto. Considerar estas diferencias en un proyecto de IGV es importante, ya que son factores clave para diseñar el entorno cooperativo, facilitar la participación, y el uso de métodos para atraer a diferentes tipos de voluntarios. También, el enfoque de *crowdsourcing* que

sigue un proyecto, junto con su visión y objetivos, determina las características y composición de las contribuciones y los medios para obtenerlas.

En la Tabla 1 se muestran algunas de las características más importantes de la participación en línea relacionadas con cada uno de las dos tendencias del continuo de estrategias de *crowdsourcing* (*crowd/comunidad*) y su modo de operar. Para los proyectos de IGV, sirve como una guía resumida para empezar a planificar un proceso de participación basado en *crowdsourcing* y sus características. Estas características son las que normalmente se puede observar o esperar en cada uno de los extremos, sin embargo, en general es típico que se presente una combinación intermedia de ambas.

Tabla 1: Características de la participación en línea basada en *crowd* o en comunidad

Participación basada en la <i>crowd</i>	Participación basada en una comunidad
Contributiva	Colaborativa/Participativa
Participación más pasiva	Participación más activa
Mayor control de la organización	Menor control de la organización
Menor grado de autonomía	Mayor grado de autonomía
Individuos aislados	Asociaciones/Relaciones
Interacción nula/baja entre participantes	Interacción alta entre participantes
Contribuciones independientes	Contribuciones interdependientes
Contribuciones más homogéneas	Contribuciones más heterogéneas
Bajo nivel de implicación/compromiso	Medio/Alto nivel de implicación/compromiso
Tareas requieren menor esfuerzo	Tareas requieren mayor esfuerzo
Uso de capacidades cognitivas bajo	Uso de capacidades cognitivas medio/alto
Menor grado de conocimientos/entrenamiento	Mayor grado de conocimientos/entrenamiento
Motivaciones individuales y altruistas	Motivaciones de grupo (en formar parte de) y altruistas

3.3. Diseño de la estrategia de *crowdsourcing*

En esta sección se propone una herramienta para el diseño de la estrategia o proceso central de *crowdsourcing* de un SIGV, que será implementada en un proyecto. La estrategia es una hoja de ruta en la que se define y planifica el cómo llevar el proyecto hacia el logro de los objetivos planteados. Los objetivos particulares de un proyecto de IGV se obtienen mediante las diferentes contribuciones requeridas por los voluntarios. Para lo cual previamente, se debe identificar el modo de organización que mejor se adapte a los requisitos del flujo de trabajo a realizar por los participantes, al igual que caracterizar la tarea y sus acciones (e interacciones) centrales; lo anterior se encuentra enmarcado dentro de una estrategia de *crowdsourcing*. En la sección anterior analizamos

diferentes tipologías de *crowdsourcing* que se encuentran intrínsecamente vinculadas según el nivel existente de implicación y compromiso en la participación. Las distintas características de los métodos analizados nos llevaron a identificar un espectro o continuo de participación, y definir dos tendencias existentes al diseñar proyectos: los basados en la *crowd*, y los impulsados por una comunidad con mayores niveles de colaboración. Relacionado con lo anterior, también observamos que, a medida que el nivel de participación aumenta, lo cual se traduce en mayor implicación y compromiso de los voluntarios, el modo de operar del proyecto tiende a pasar de sólo contribuciones rutinarias, a la colaboración y co-creación. Correspondientemente, los niveles más altos de participación, como ilustra la tipología de Haklay, también están correlacionados con un mayor uso de las capacidades cognitivas de los participantes, lo que permite diseñar y solicitar tareas que conlleven mayor esfuerzo o complejidad.

Basado en lo anterior, una vez que se ha caracterizado un proyecto y se tiene definido su objetivo, proponemos identificar y diseñar la estrategia o proceso central de *crowdsourcing* que requiere un SIGV usando dos criterios:

1. **Nivel de participación** (implicación/compromiso) **según el modo de organización** contributivo, colaborativo o participativo.
2. **Implicación cognitiva de los participantes para realizar la tarea**, en dónde proponemos su caracterización en función de la demanda cognitiva y de las habilidades requeridas para realizar la tarea.

El primer criterio, introducido inicialmente en la sección 3.1, corresponde al nivel de participación existente en una comunidad, determinado por el modo de organización (operación) más adecuado para obtener y asimilar las contribuciones de los participantes que un proyecto requiere; los modos de operación se clasifican en contributivo, colaborativo o participativo (co-creativo). Como ya se mencionó anteriormente, los distintos niveles de implicación y compromiso de los voluntarios permiten diferentes grados de interacción, interdependencia de las contribuciones, complejidad de las tareas y la posibilidad o no de generar valor emergente basado en la colaboración. El segundo criterio, la implicación cognitiva requerida de los participantes, se relaciona con el grado o cantidad de esfuerzo mental y las habilidades necesarias para trabajar en una tarea. Basado en investigaciones del dominio cognitivo (procesar información, conocimiento y habilidades mentales) y los procesos de aprendizaje, la demanda cognitiva se considera una característica intrínseca a las tareas y consiste en el tipo y nivel de pensamiento requerido para trabajar en una tarea y resolverla (Smith and Stein 1998). Las tareas de baja demanda cognitiva involucran el señalar hechos, seguir procedimientos conocidos y resolver problemas rutinarios, no requieren un gran esfuerzo intelectual y se centran principalmente en proporcionar respuestas concretas y usar conocimientos previos sin necesidad de establecer o realizar nuevas conexiones (Van De Walle *et al.* 2012). Por el contrario, las tareas de demanda cognitiva alta involucran el establecimiento de

conexiones, analizar la información y sacar conclusiones (Smith and Stein 1998). Por otro lado, siguiendo a Erickson *et al.* (2012), podemos clasificar las habilidades necesarias para completar una tarea de *crowdsourcing* como: habilidades comunes o generales, requeridas en tareas sencillas y rutinarias; habilidades especializadas o avanzadas; y habilidades específicamente relacionadas a un dominio científico o tecnológico particular. Finalmente, con el objetivo de caracterizar la implicación cognitiva global o total para realizar una tarea, de menor a mayor uso de habilidades cognitivas por los participantes, proponemos tomar en consideración tanto la demanda cognitiva (clasificándola como baja, media y alta) y las habilidades requeridas para realizar la tarea (comunes, especializadas y relacionadas a un dominio). Combinando ambos criterios, podemos considerar el nivel más bajo de implicación cognitiva, cuando se requiere una demanda cognitiva baja y se hace uso de una habilidad común para realizar una tarea; por el contrario, el nivel más alto corresponde a una tarea que requiere una demanda cognitiva alta y hace uso de habilidades relacionadas con un dominio de conocimiento específico. Adicionalmente a los dos criterios principales, es de utilidad introducir la taxonomía de Bloom de habilidades de pensamiento, revisada y modificada por Anderson and Krathwohl (2001). Esta taxonomía sirve como soporte adicional al caracterizar la implicación y demanda cognitiva que tendrá una tarea relacionada con la gestión de información y la resolución de problemas, entendiendo mejor cómo abordar su diseño y las características de participación. La taxonomía revisada incluye seis categorías de habilidades de pensamiento en orden creciente de demanda cognitiva. Las habilidades de pensamiento de orden inferior son: *recordar*, asociada a acciones como identificar, enlistar, reconocer o describir algo; *entender*, relacionada a

actividades como explicar, interpretar y resumir información; y *aplicar*, relacionada con implementar, calcular, y el uso y aplicación de información previa. En cuanto a las habilidades de pensamiento de orden superior se presentan las siguientes: *analizar*, asociada a comparar, integrar, encontrar e inferir información; *evaluar*, relacionada con la deducción y acciones como juzgar, experimentar, monitorizar y formular hipótesis; *crear*, que involucra acciones como producir, idear, planificar y diseñar.

El análisis de los criterios propuestos para diseñar una estrategia de *crowdsourcing* ayuda a formular, responder y planificar cuestiones de diseño como las siguientes: ¿Qué nivel de complejidad, demanda cognitiva y habilidades son necesarias para que los participantes puedan realizar las tareas de gestión de información que se van externalizar a la comunidad? ¿Cuál es la dinámica de participación requerida mientras se realiza una tarea y para contribuir en los diferentes procesos del proyecto? ¿La demanda cognitiva de una tarea hace necesario implementar un modo de organización específico para la comunidad, para poder llegar al resultado esperado? ¿Se tiene como objetivo generar un conocimiento emergente basado en la colaboración sinérgica? ¿Es necesaria una colaboración interdependiente o un proceso participativo?, o, por el contrario, ¿Es posible de lograr los objetivos mediante contribuciones aisladas? La Figura 3 ilustra visualmente los criterios de diseño propuestos para caracterizar una estrategia de *crowdsourcing*. También, ayuda a identificar si la participación tiene características con tendencia hacia la *crowd* o hacia una comunidad con mayor interacción. Además, se localizaron de forma aproximada algunos métodos de *crowdsourcing* y actividades relacionadas dentro del diagrama, como referencia de su funcionamiento en relación con los criterios de diseño.

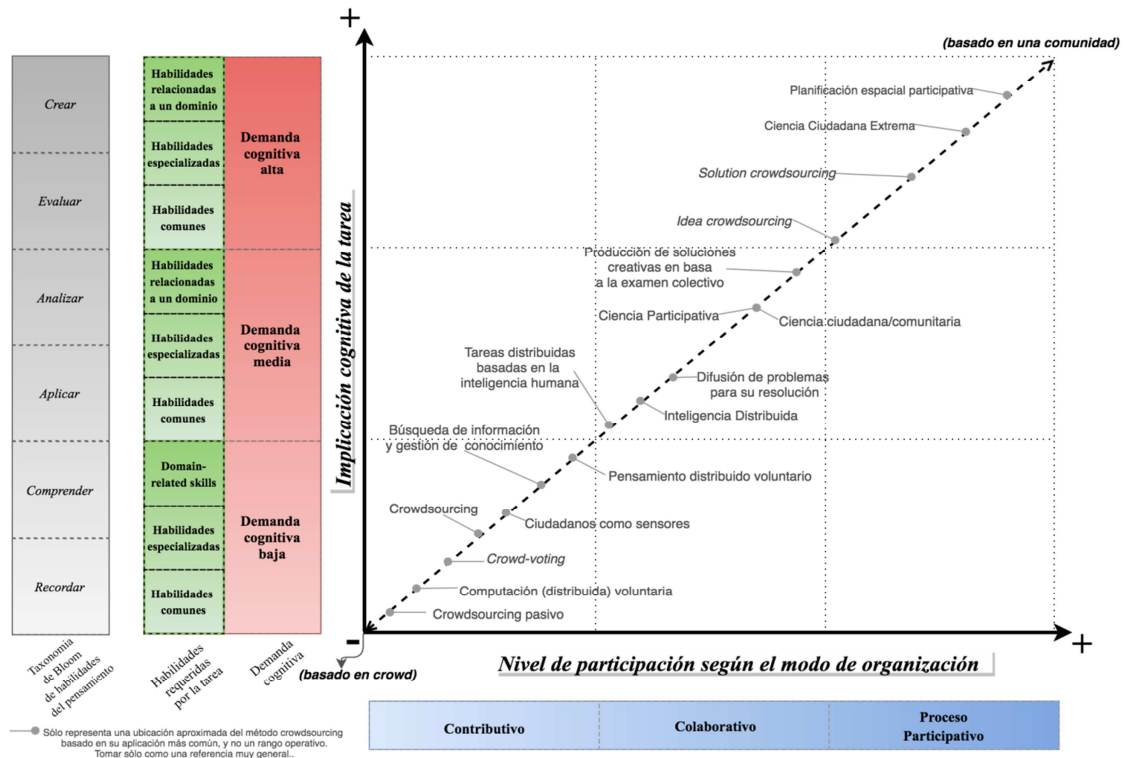


Figura 3: Criterios de diseño de la estrategia de crowdsourcing de un proyecto de IG. V.

4. Conclusiones

En este trabajo se abordó el diseño de una de las estrategias necesarias de definir y planificar en los SIGV, la estrategia de *crowdsourcing*. Esta estrategia se define dentro del contexto de un proyecto de IGV, siendo el primer paso y variable de la que depende la planificación y el diseño interdependiente de los otros componentes del sistema: participantes y tecnología. Las demás estrategias del sistema, tales como las estrategias para atraer, facilitar, sostener y retener la participación, así como las relacionadas con el desarrollo del componente tecnológico, no se han analizado en este trabajo. Sin embargo, estas últimas están totalmente vinculadas, al tratarse de un enfoque de diseño sistémico, a la estrategia de *crowdsourcing*, la cual debe de ser la primera en diseñarse siendo la que guía a las demás estrategias junto con otros criterios del proyecto.

Los criterios que se han propuesto en la herramienta de diseño de la estrategia de *crowdsourcing*, ayudan a caracterizar y definir de un modo simple los requerimientos generales de los procesos y las actividades de un SIGV que se pretenden externalizar a una red distribuida de individuos en la Web; ya sea siguiendo una actividad realizada de forma independiente por una *crowd*, o buscando una mayor colaboración para aprovechar los beneficios del trabajo integrado en una comunidad. Es necesario que las posteriores etapas de desarrollo e implementación del proyecto y las herramientas tecnológicas, en las que se definirá la mecánica de las tareas de *crowdsourcing* y sus acciones núcleo concretas, estén fundamentadas y alineadas con esta estrategia, ya que los criterios de diseño propuesto tienen un impacto directo en su desarrollo. De igual forma, al diseñar las tareas, no es posible considerar de manera independiente la estrategia de *crowdsourcing* (el cómo se pretende obtener las contribuciones) y la naturaleza de los datos e información de las contribuciones (incluyendo sus usos, calidad esperada o requerida y demás atributos), sino de forma integrada.

Entre las características necesarias a considerar, se encuentra la dimensión espacial de la contribución. Ésta puede ser asociada a una localización o coordenadas específicas que se basan en un marco de referencia geográfica (por ejemplo una medida u observación física o medioambiental objetiva asociada a una coordenada); o una contribución (generalmente de carácter más subjetivo) vinculada a un lugar (definido como «una localización creada por experiencias humanas» (Grantham and Tuan 1978), con características físicas y humanas asociadas), como un barrio, una calle, un centro deportivo o una iglesia. En cuanto a los atributos de la información se tendría que considerar la flexibilidad en su estructura, presentándose de forma

estructurada o no estructurada (Deparday 2010), y en su caso los diferentes niveles de estructuración. También si se trata de hechos u opiniones, diferenciándose en contribuciones objetivas o subjetivas (Tulloch 2008; Deparday 2010). Y finalmente el grado de interacción en el flujo de los datos: unidireccional, bidireccional o n-direccional (Deparday 2010). Este último atributo, directamente relacionado con contribuciones individuales o la colaboración de los participantes, expuesto en secciones anteriores. Además, las herramientas tecnológicas a utilizar o desarrollar, así como las acciones de los participantes para la obtención de información y modos de captura, van estar determinadas por estas características espaciales y los diferentes tipos de atributos.

Por otro lado, en este trabajo también se han abordado los aspectos interdependientes al analizar la producción de la IGV mediante el estudio y desarrollo de un sistema. Se identificó a la organización y el proyecto, el proceso y las contribuciones basado en *crowdsourcing*, y su vinculación con la participación y el uso de tecnología, como elementos esenciales que hay que analizar y tomar en consideración al diseñar e implementar un SIGV. En este sentido, el diseño de un SIGV sigue una serie de pasos que involucran a sus componentes e interacción. Iniciando desde la detección de un problema u oportunidad que se puede abordar mediante el *crowdsourcing* de IG y la organización de una comunidad en línea, la definición de los propósitos y objetivos de un proyecto, para pasar a la exploración de las estrategias de *crowdsourcing* más adecuadas. Los pasos siguientes consisten en alinear y vincular los objetivos y necesidades organizacionales con la mejor estrategia de *crowdsourcing* (analizado en el este trabajo); basado en lo anterior, definir las características de la información a contribuir, e identificar factores que motiven y faciliten la participación según las características de la estrategia definida. Después, la vinculación y alineación de la estrategia de *crowdsourcing* con un entorno de cooperación adecuado (incluyendo la definición de las tareas y acciones a realizar por los participantes), y con las estrategias de participación necesarias (para atraer, enganchar y retener la participación). Por último, la vinculación con el desarrollo de las herramientas tecnológicas más adecuadas que faciliten las tareas y acciones de los participantes.

Finalmente, es importante el definir criterios y métricas de control para observar el rendimiento y resultados del sistema, incluyendo los criterios de éxito que nos indiquen si las estrategias y herramientas implementadas están funcionando para avanzar hacia el logro de los objetivos. Lo anterior, basado en las medidas de rendimiento, facilita el realizar experimentos para la mejora iterativa del sistema utilizando metodologías de desarrollo *Lean* y *Agiles*.

References

- ALTER, S., 2008. Defining information systems as work systems: implications for the IS field. *European Journal of Information Systems*, 17(5), pp. 448–469.
- ANDERSON, L.W. and KRATHWOHL, D.R., 2001. A taxonomy for learning, teaching, and assessing: A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives. *Theory Into Practice*, Complete e, p.xxix, 352 . Available: <http://www.mendeley.com/research/a-taxonomy-for-learning-teaching-and-assessing-a-revision-of-blooms-taxonomy-of-educational-objectives-abridged-edition-1/>.

- AVISON, D., WOOD-HARPER, A. and ANTILL, L., 1990. *Multiview: An exploration in information systems development*, Alfred Waller Ltd. Available: <http://library.wur.nl/WebQuery/clc/549448> [4/25, 2016].
- BRABHAM, D.C., 2013. *Crowdsourcing* The MIT Pr., MIT Press. Available: <https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=ndcnAAAAQBAJ&pgis=1> [9/16, 2015].
- BRUNS, A., 2006. Towards Prodsusage: Futures for User-Led Content Production. *Cultural Attitudes towards Communication and Technology*.
- CRAMPTON, J.W., 2009. Cartography: maps 2.0. *Progress in Human Geography*, **33**(1), pp. 91–100.
- DEPARDAY, V., 2010. Enhancing Volunteered Geographical Information (VGI) Visualization with Open Source Web-Based Software. University of Waterloo. Available: http://www.google.com/url?sa=t&source=web&cd=2&ved=0CBwQFjAB&url=http://uwspace.uwaterloo.ca/bitstream/10012/5709/1/Deparday_Vivien.pdf&ei=UgboTaWTIKLSiALNo6nSCw&usq=AFQjCNGvZGVKSRiGprb7OoeXNnPCRftrdQ.
- ELWOOD, S., 2008a. Volunteered geographic information: Future research directions motivated by critical, participatory, and feminist GIS. *GeoJournal*, **72**(3–4), pp. 173–183.
- ELWOOD, S., 2008b. Volunteered geographic information: Key questions, concepts and methods to guide emerging research and practice. *GeoJournal*, **72**(3–4), pp. 133–135.
- ERICKSON, L.B., PETRICK, I., and TRAUTH, E.M., 2012. Hanging with the right crowd: Matching crowdsourcing need to crowd characteristics. In *AMCIS 2012 Proceedings*. Seattle, USA, pp. 1–9.
- FAST, V. and RINNER, C., 2014. A Systems Perspective on Volunteered Geographic Information. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, **3**(4), pp. 1278–1292. Available: <http://www.mdpi.com/2220-9964/3/4/1278/>.
- GOODCHILD, M.F., 2007a. Citizens as sensors: the world of volunteered geography. *GeoJournal*, **69**(4), pp.211–221. Available: <http://link.springer.com/10.1007/s10708-007-9111-y> [7/14, 2014].
- GOODCHILD, M.F., 2007b. Citizens as voluntary sensors: spatial data infrastructure in the world of Web 2.0. *International Journal of Spatial Data Infrastructure Research*, **2**, pp.24–42. Available: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.162.2017> [4/25, 2016].
- GRANTHAM, C.E. and TUAN, Y.F., 1978. Space and Place: The Perspective of Experience. *Contemporary Sociology*, **7**(4), p.513.
- HAKLAY, M., 2013. Citizen Science and Volunteered Geographic Information: Overview and Typology of Participation. In D. Sui, S. Elwood, & M. Goodchild, eds. *Crowdsourcing Geographic Knowledge*. Springer Netherlands, pp. 105–122. Available: [citeulike-article-id:13292849%5Cnhttp://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-4587-2_7](http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-4587-2_7).
- HAKLAY, M., ANTONIOU, V. and BASIOUKA, S., 2014. *Crowdsourced Geographic Information Use in Government*, Available: <http://discovery.ucl.ac.uk/1433169/> [9/10, 2014].
- HAKLAY, M., SINGLETON, A. and PARKER, C., 2008. Web mapping 2.0: The neogeography of the GeoWeb. *Geography Compass*, **2**(6), pp. 2011–2039.
- HOWE, J., 2006. The Rise of Crowdsourcing. *Wired Magazine*, **14**(6), pp.1–5.
- MAGUIRE, D., 2006. GeoWeb 2.0 Implications for ESDI. In *12th EC-GIGIS Workshop*. Innsbruck, Austria. Available: [http://www.ec-gis.org/Workshops/12ec-gis/presentations/Plenary room/Opening/GeoWeb2_2.pdf](http://www.ec-gis.org/Workshops/12ec-gis/presentations/Plenary%20room/Opening/GeoWeb2_2.pdf) [4/25, 2016].
- O'REILLY, T., 2005. What Is Web 2.0. Available: <http://oreilly.com/web2/archive/what-is-web-20.html> [3/6, 2017].
- SCHARL, A., 2007. Towards the geospatial web: media platforms for managing geotagged knowledge repositories. In *The Geospatial Web - How Geo-Browsers, Social Software and the Web 2.0 are Shaping the Network Society*. pp. 3–14.
- SMITH, M.S. and STEIN, M.K., 1998. Selecting and creating mathematical tasks: From research to practice. *Mathematics Teaching in the Middle School*, **3**(5), pp.344–350.
- SUI, D.Z., 2008. The wikification of GIS and its consequences: Or Angelina Jolie's new tattoo and the future of GIS. *Computers, Environment and Urban Systems*, **32**(1), pp.1–5.
- TOFFLER, A., 1980. *The Third Wave*,
- TURNER, A., 2006. *Introduction to Neogeography*, O'Reilly Media, Inc. Available: <http://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=oHgDv4feV-8C&pgis=1> [11/27, 2014].
- VAN DE WALLE, J., KARP, K. and BAY-WILLIAMS, J., 2012. *Elementary and middle school mathematics: Teaching developmentally* 8th ed., Pearson.

LA REPRESENTACIÓN GRÁFICA GEORREFERENCIADA ALTERNATIVA EN LA COORDINACIÓN CATASTRO-REGISTRO EN ESPAÑA. ESTUDIO DE LA IMPLANTACIÓN DE LA NORMA ISO-19152 (LADM) A NIVEL INTERNACIONAL

THE GEORREFERENCED ALTERNATIVE GRAPHIC REPRESENTATION IN THE CADASTRE-LAND REGISTRY COORDINATION IN SPAIN. IMPLEMENTATION STUDY OF THE ISO-19152 (LADM) AT THE INTERNATIONAL LEVEL

Joan Manuel Velilla-Torres*, Gaspar Mora-Navarro, Carmen Femenia-Ribera, José Carlos Martínez-Llario

Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, Edificio 7i, 46022 Valencia. joavetor@doctor.upv.es; joamona@cgf.upv.es; cfemenia@cgf.upv.es; jomarilla@cgf.upv.es

Abstract:

In Spain, the new Law 13/2015, dated June 24, modifying the Mortgage Law and the Cadastre Law in the search for its coordination, introduce the obligation to obtain georeferenced mapping and update the Cadastre in many cases. It is necessary to provide the graphic representation of the farms in case of: segregation, division, grouping and aggregation, and in the case of the operations of parceling, reparcelling, land consolidation, segregation, division, grouping or aggregation, forced expropriation or demarcation which determine a reordering of the land. It also requires the geographical delimitation of the area occupied by buildings declared within a farm. In all of these cases, if there is no coincidence of the farm in the field with the descriptive cadastral certification and the graphic of the farm, an alternative georeferenced graphical representation, duly accredited, is necessary, and where the adventurers are quoted to express or not their Conformity. This thesis aims to investigate an international level with the possibility of collaborating in the current developments, especially applying the ISO 19152 (On the Land Administration Domain Model) to the Spanish case and national level, applying the new Reforms of the Mortgage Law and the Cadastre Law. Performing georeferenced graphical maps, in the cases in which the law forces it. To develop GIS software for the automation of information creation, as well as, the new formats creation used to Spanish Cadastre updating. The software will be tested in the real cases that will be performed.

Key words: Reform Mortgage Law, LADM, GeoDelProp, ATNL

Resumen:

En España, la nueva Ley 13/2015, de 24 de junio, que modifica la Ley Hipotecaria y la Ley del Catastro en la búsqueda de su coordinación introduce la obligatoriedad de obtener cartografía georeferenciada y actualizar el Catastro en muchos casos. Es necesario aportar la representación gráfica de las fincas en caso de: segregación, división, agrupación y agregación, y en caso de que se realicen operaciones de parcelación, reparcelación, concentración parcelaria, segregación, división, agrupación o agregación, expropiación forzosa o deslinde que determinen una reordenación de los terrenos. También exige la delimitación geográfica de la superficie ocupada por las construcciones que se declaren dentro de una finca. En todos estos supuestos, si no hay coincidencia de la finca en el terreno con la certificación catastral descriptiva y gráfica de la finca, es necesaria una representación gráfica georeferenciada alternativa, debidamente acreditada, y donde se cita a los colindantes para que expresen o no su conformidad. En esta tesis se pretende investigar a nivel internacional con la posibilidad de colaborar en los desarrollos actuales, sobre todo aplicando la norma ISO 19152 (Sobre Land Administration Domain Model) al caso español y a nivel nacional, aplicando las nuevas reformas de la Ley Hipotecaria y la Ley del Catastro. Realizando representaciones gráficas georeferenciadas alternativas en casos en los que la ley obliga. Desarrollar aplicaciones SIG para la automatización y generación de la información y de los nuevos formatos necesarios para la actualización del Catastro español, aplicándolo a los casos prácticos que se realicen.

Palabras clave: Reforma Ley Hipotecaria, LADM, GeoDelProp, ATNL

1. Reforma de la Ley Hipotecaria 13/2015

La Ley 13/2015, de 24 de junio, de Reforma de la Ley Hipotecaria aprobada por Decreto de 8 de febrero de 1946 y del texto refundido de la Ley de Catastro

Inmobiliario, aprobado por Real Decreto Legislativo 1/2004, de 5 de marzo, ha sido publicada en el BOE el 25 de junio de 2015.

* Corresponding Author: Joan Manuel Velilla-Torres, joavetor@doctor.upv.es

Esta ley tiene como fin resolver varios problemas que presentaba la regulación existente, y como bases de esta reforma se puede anunciar que:

Anteriormente, la delimitación de los deslindes de las fincas registradas era potestativa, es decir, no era obligatoria, permitiendo bases gráficas no georreferenciadas. Con la reforma, la descripción gráfica de las fincas registrales será obligatoria en los supuestos de modificación de la configuración territorial de las fincas registrales. En el resto de casos será voluntaria. Esta representación gráfica deberá tener georreferenciada su delimitación en un sistema oficial, ya que permitirá distinguirla de las colindantes, ubicarla y delimitarla sobre el territorio.

La cartografía catastral se constituye como base gráfica del Registro de la Propiedad para la descripción de las fincas, según el artículo 10.

Se regulan todos los procedimientos de inscripción en el Registro de la Propiedad para garantizar la coordinación con el Catastro inmobiliario (Berné 2004). Los procedimientos de coordinación se regulan de manera muy garantista para evitar perjuicios a terceros y colindantes.

Se debe de aportar, junto a la justificación catastral descriptiva y gráfica, la descripción de la finca que hacen los Registradores indicando si está coordinada o no gráficamente con el Catastro. Por lo que, la creación de la figura de la finca coordinada gráficamente con el Catastro, tendrá efectos jurídicos reforzados (presunción de certeza) tras la calificación del registrador. A continuación se ha de trasladar al catastro el código registral único de la finca cuando se alcance esta coordinación.

Se regula de manera detallada la interoperabilidad entre el Catastro y el Registro de la Propiedad. El proceso de coordinación será paulatino a medida que se inscriben en el Registro los nuevos actos o negocios donde se reflejen alteraciones de las fincas.

La representación gráfica alternativa se realizará cuando la cartografía del catastro no se corresponda con la realidad o cuando la finca surja al tráfico jurídico, y que, por lo tanto, tampoco exista en el catastro.

1.1. Representación Gráfica Alternativa (RGA)

- Permite a los interesados incorporar las alteraciones que se produzcan en los inmuebles, o rectificar la cartografía catastral por los procedimientos establecidos.
- Debe ser de aprobada expresamente por el propietario o interesados.
- Tiene que ser representada sobre la cartografía catastral.
- Se debe representar las coordenadas georreferenciadas de los vértices en todos sus elementos.
- Tiene que hacerse en un fichero informático con soporte GML, y en el formato de parcela catastral INSPIRE.

- Indicar la fecha de su realización y su metodología.
- Que es responsabilidad, del técnico que haya realizado la representación geográfica, que sean ciertas las condiciones técnicas con las que describe su trabajo.
- La resolución se podrá obtener mediante levantamiento topográfico del terreno, pero no será obligatorio.
- El sistema de referencia es el ETRS89 en la península, y REGCAN en las Islas Canarias, en la proyección universal transversal de Mercator UTM.

Para una **validación gráfica** de la RGA se utiliza el servicio automatizado en la Sede Electrónica del Catastro (SEC). Si esta validación es positiva, se obtiene un informe de validación gráfica (IVG). El IVG es un informe técnico que valida gráficamente la RGA elaborada por los interesados, pero no valida la legalidad de la operación que se propone. El IVG es potestativo y no vinculante.

El **fichero GML** (Geography Markup Language) (Zhang *et al.* 2011) debe de estar firmado electrónicamente por el técnico competente, y tiene que contener el Identificador único del objeto, sistema de referencia, listado de vértices que definen la poligonal cerrada terminando y empezando las listas de los vértices siempre en el mismo vértice. Si la parcela catastral tiene huecos se añaden estructuras con su geometría, referencia catastral, país y organismo, etiqueta, referencia catastral nacional y las coordenadas del centroide.

Nueva regularización de la inscripción de las edificaciones en el Registro de la Propiedad.

Antes de la ley 13/2015, cuando había una edificación el técnico certificaba de la antigüedad de la edificación que incorporaba en el documento público y se llevaba al registro.

Ahora, según el Art 102, la porción del suelo ocupada por cualquier edificación, instalación o plantación tiene que estar identificada mediante sus coordenadas de representación geográfica, y en el caso de que se trate de edificaciones en régimen de propiedad horizontal, se hará constar en el folio real de cada elemento, independiente su respectiva representación gráfica, tomada del proyecto incorporado al libro del edificio.

2. Delimitación topográfica de un finca registral aplicando la Reforma de la Ley Hipotecaria

Para poner en práctica dicha Reforma de la Ley Hipotecaria, se realizó una delimitación topográfica de una finca registral situada en el municipio de Montserrat, ya que dicha finca, por una equivocación informada en su día en el Catastro, en la actualidad aparecía grafada con un desplazamiento a una parcela distinta a la que realmente corresponde. En concreto aparece en la parcela 205 cuando en realidad su ubicación es en la parcela 376. En la Figura 1 se demuestra, con un dibujo aproximado en el que el propietario identificó dicho desplazamiento:



Figura 1: Parcelas a delimitar en el Proyecto.

Las líneas y textos en negrita corresponden a las delimitaciones y anotaciones de la cartografía catastral. Las líneas en rojo corresponden a una aproximación de la delimitación topográfica correcta de las fincas catastrales, y las anotaciones en amarillo a la ubicación correcta de las parcelas catastrales. Se observa que las delimitaciones de las parcelas 376 y 178, según el catastro, no corresponde con las delimitaciones de la realidad dibujadas en rojo, quedando parte de la finca de la parcela 376 dentro de la parcela 205. La parcela 178 pertenece al Ayuntamiento de Montserrat.

Para la delimitación topográfica de la finca, se realiza una medición topográfica con GPS de todos sus linderos. Durante la medición acudió un representante del propietario, estando de acuerdo en dicho trabajo en la toma de puntos de los lindes junto a sus respectivas fotografías.

2.1. Equipo utilizado y precisiones

El levantamiento topográfico de este trabajo, se ha realizado con **tecnología RTK con solución de red VRS**. Esta técnica alcanza precisiones de hasta 2 cm, de desviación típica, en el sistema de referencia ETRS89. El equipo utilizado ha sido el GPS Leica System 1200. Por razones de rendimiento, se configura el equipo para asegurar una **precisión de 5 centímetros**, en el sistema de coordenadas EPSG 25830.

2.2. Cartografía existente en el trabajo

Cartografía catastral, obtenida de la SEC, en la fecha del levantamiento. Se utiliza para comprobar la coincidencia del levantamiento con la cartografía catastral.

Cartografía del PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea), a partir de servicios WMS se obtiene una imagen recortada de dicha cartografía en la zona de trabajo, que georreferenciándola e incorporándola al proyecto se utiliza como fondo del levantamiento, para que el propietario reconozca los elementos existentes

en el terreno, junto a las líneas de los linderos dibujadas.

Planos de la Cartografía histórica catastral, producida por el entonces Instituto Geográfico Catastral, el Mapa Topográfico Parcelario (MTP).

Plano topográfico antiguo, producido por Jose Soler Trilla colegiado del Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía, realizado el 1977, a escala 1/500.

2.3. Importación a GeoDelProp

Una vez realizado el levantamiento topográfico, se publican sus datos espaciales, tanto geometrías como metadatos, con software GeoDelProp, basado en el software TopoDelProp (Mora-Navarro 2013). Con esto, se pretende ayudar a Notarios, Registradores y ciudadanos a identificar sus lindes sobre el terreno, de forma que se añade seguridad al proceso de delimitación. Este software permite generar y descargar los ficheros GML INSPIRE con las geometrías de los elementos espaciales para una validación en el Catastro (Fig. 2).



Figura 2: Publicación en el geoportal GeoDelProp (<http://upvvsig.car.upv.es/geodelprop/>).

2.4. Actualización cartografía en el Catastro

La actualización de la cartografía en el Catastro se pretendía realizar a través de una Notaría siguiendo los procedimientos que marca la nueva Ley, pero siendo tan reciente la norma (pocos meses) no están preparados todos los cauces necesarios para realizar correctamente el procedimiento a través de la Notaría. Por ello, en este caso, se optó por realizar la actualización de la cartografía catastral aportando el GML directamente a Catastro ya que corría prisa y de este modo se comprobaba la actualización.

Destacar que, la aportación de GML por los técnicos utilizando los IVG del Catastro está contemplado en la nueva Ley siempre que se realicen a través de Notarías y Registros; pero no contempla el caso de aportarlos directamente a Catastro. En caso de realizar la actualización y coordinación gráfica entre Catastro y Registro la coincidencia gráfica con la RGA del técnico debe ser exacta.

Tras entregar la información directamente a Catastro finalmente se obtienen los resultados de la actualización de la cartografía catastral quedando, como se observa en las Figuras 3 y 4.

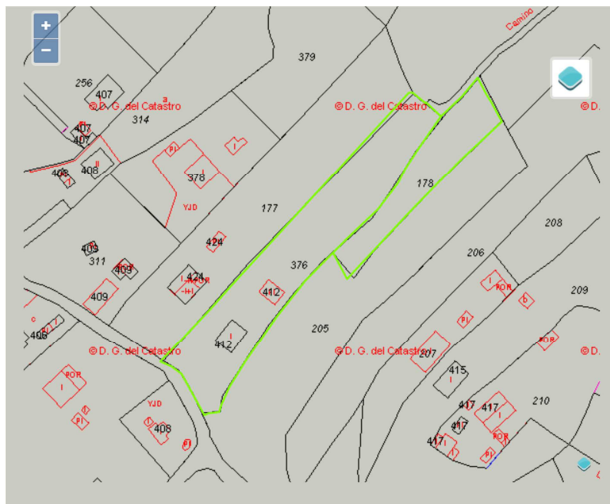


Figura 3: Resultado tras la actualización del Catastro.



Figura 4: Zoom al resultado tras la actualización del Catastro.

Las líneas en verde corresponden a los lindes del levantamiento topográfico realizado, y las líneas en negro y rojo corresponden a la cartografía catastral junto con sus anotaciones. La cartografía catastral no coincide exactamente con la geometría del levantamiento topográfico, ello es debido a que no se ha tramitado la información gráfica a través de la Notaría y/o Registro; en este caso la coincidencia sería total. Al tramitarlo directamente a través de Catastro las pequeñas variaciones en la cartografía entran en tolerancia técnica o no es necesaria subsanarlas. A pesar de que existen diferencias que no encajan perfectamente, el propietario de la parcela catastral está conforme con el resultado, considerando que es suficiente para la finalidad planteada.

Con este trabajo práctico se puede concluir que se ha conseguido investigar y estudiar la Reforma de la Ley Hipotecaria aplicándola a un caso en concreto obteniendo unos resultados satisfactorios. Se ha realizado un levantamiento topográfico de una finca con una precisión de 5 centímetros en las coordenadas tomadas. La publicación en el software GeoDelProp facilita a Notarios, Registradores, propietarios y vecinos identificar los lindes y crear el archivo GML para validación en el Catastro. El desarrollo de este proyecto se ha concluido con un informe para el Registrador de la Propiedad junto con sus planos. Un ejemplo estos planos es el representado en la Figura 5, donde se

indica en color azul la delimitación resultante de las fincas número 376 y 178 tomadas en el levantamiento junto con las coordenadas de sus puntos.

En la Figura 5 se muestra la cartografía catastral de las fincas, en color rojo, y el levantamiento realizado, donde realmente deberían estar situadas, en color azul.

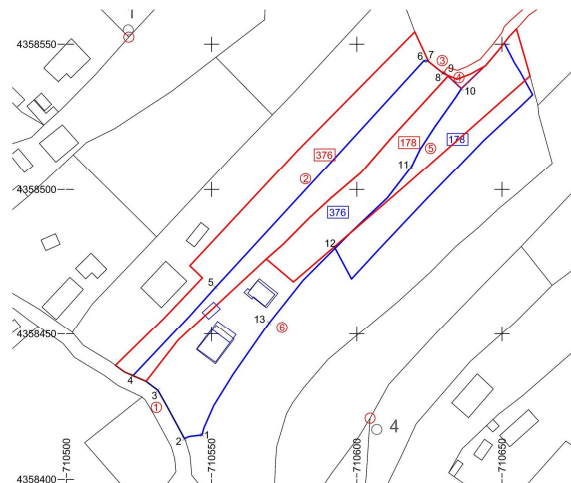


Figura 5: Plano de coordenadas del levantamiento topográfico.

Las coordenadas UTM han sido tomadas en el huso 30, en el sistema de referencia ETRS89 con un error máximo en cada punto de 0.1 m (Fig. 6). Los elementos divisores de las fincas se han medido según las señales existentes en el terreno: muros, vallas, caminos etc...

Pto	X	Y	Precisión
1	710546,68	4358415,23	Catastro
2	710540,65	4358413,95	Catastro
3	710531,52	4358430,57	Catastro
4	710522,93	4358435,58	Catastro
5	710551,37	4358466,26	0,1
6	710623,05	4358544,28	0,1
7	710624,73	4358544,08	Catastro
8	710629,75	4358540,08	Catastro
9	710629,99	4358540,41	0,1
10	710636,00	4358534,81	0,1
11	710618,80	4358507,90	0,1
12	710592,51	4358479,69	0,1
13	710569,83	4358453,92	0,1

PARCELA	ÁREA FINAL
178	1254,20
376	3303,66

Figura 6: Coordenadas del levantamiento topográfico.

El trámite tradicional a través de Catastro es suficiente en determinados casos, aunque si se pretende una mayor rapidez y precisión en la representación gráfica lo mejor es tramitar los procedimientos adecuados a través de Notarías y Registros aplicando la nueva Ley. En estos momentos (mayo 2017) aún no están totalmente operativos los procedimientos que permitan actualizar

rápidamente las RGA que procedan de Notaría y Registros, pero en el momento en que los estén se pretende que sean prácticamente automáticos y permitan modificar parcelas catastrales en días, incluso minutos, y con la misma precisión con la que ha medido el técnico. Se espera que en unos pocos meses sea posible.

3. ATNL – Archivo Topográfico Nacional de Lindes del Colegio Oficial de Ingenieros en Geomática y Topografía

El objetivo del ATNL es tener un geoportal que publique geometrías y metadatos topográficos de delimitaciones realizadas por ingenieros colegiados, con el principal objetivo de añadir seguridad al tráfico inmobiliario, basado en la facilidad de comprensión, y de acceso a los datos y metadatos, del trabajo de delimitación, que se consigue con esta plataforma (Fig. 7). Los destinatarios de esta información son notarios, registradores y usuarios afectados por la delimitación.

En este geoportal se puede observar y consultar la información gráfica y alfanumérica de los lindes obtenidos en cada delimitación. Esta base de datos está compuesta por los trabajos de deslindes realizados por los colegiados, que han decidido incorporarlos al ATNL.

El proyecto ATNL se ha basado en los proyectos TopoDelProp y GeoDelProp, desarrollados en la Universidad Politécnica de Valencia.

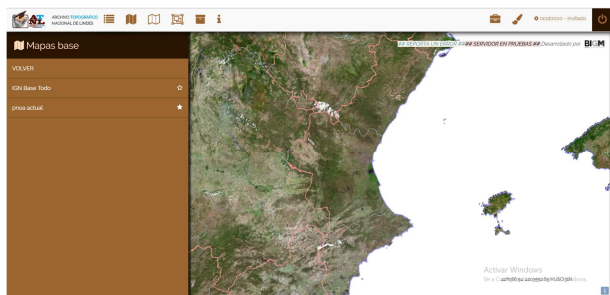


Figura 7: Visor Cartográfico ATNL.

Se pretende próximamente, con la colaboración de notarios y registradores, probar el proyecto ATNL para identificar y delimitar varias fincas registrales colindantes. De este proyecto se espera obtener importantes conclusiones, como el abaratamiento de costes cuando se deslindan grupos de fincas, la utilidad de las imágenes de campo, de la facilidad de acceso a los datos geográficos, de la superposición de las geometrías obtenidas sobre otras cartografías oficiales, para contrastar sus diferencias con el deslinde, etc.

4. LADM - Land Administration Domain Model - ISO 19152

La norma ISO 19152 (Land Administration Domain Model) (Alkan and Polat 2016) es un marco internacional de un modelo de datos conceptual y genérico para la administración de tierras en cualquier país (Babalola 2015). Está basado en el marco conceptual de Catastro 2014 de la Federación Internacional de Geómetras (FIG) siguiendo los estándares desarrollados por ISO y coordinado con

otras normativas de estandarización especialmente la INSPIRE y también LPIS y STDM.

La LADM desarrolla dos aspectos utilizando el lenguaje de modelo UML (Jiao *et al.* 2006) en diagramas de clases: el primero de ellos relativo a los derechos, responsabilidades y restricciones (RRR, Right, Responsibilities and Restrictions), que afectan a la superficie terrestre o de agua. El segundo aspecto está referido a los componentes geométricos y espaciales a los que afecta el dominio anterior. Consolida la relación entre el elemento físico (parcela) y derecho, en la cual, la parcela catastral es la descripción del ámbito espacial del derecho de propiedad, lo que lleva a la conclusión de que el Catastro ha de ser la base gráfica del Registro de la Propiedad.

Sus objetivos principales son:

- Evitar la repetición de funcionalidades y así proveer de una base extensible con el fin de desarrollar y mejorar de forma eficiente y efectiva conjuntos de sistemas para administradores del territorio basados en una arquitectura de modelos.
- Permitir a todas las partes que trabajen con el territorio, ya sea un país o en diferentes países, un vocabulario común que está implícito en el modelo.
- Las cuatro clases que se divide la LADM (Velasco 2016) siguen el esquema clásico del catastro, que son:
 - **LA_Party**: Desarrolla las clases relativas a partes (personas u organizaciones) o grupos de partes (grupos de personas u organizaciones).
 - **LA_RRR**: Clases para el desarrollo de Derechos, Responsabilidades y Restricciones.
 - **LA_LAUnit**: Este paquete desarrolla la información administrativa relativa a unidades espaciales con los mismos derechos, restricciones o responsabilidades.
 - **LA_SpatialUnit**: Este paquete desarrolla las unidades espaciales, parcelas, subparcelas, edificaciones o redes.

4.1. Casos donde se aplique la LADM

4.1.1. Argentina, proyecto IDERA (Datos Espaciales de la República Argentina)

Los objetivos del proyecto se basan en:

- El tipo de información que debe disponerse.
- La interoperabilidad entre las IDEs provinciales, locales y organizacionales, ya que cada provincia de Argentina tiene desarrollada su propia IDE.
- El intercambio de información, conocimientos, herramientas de libre acceso.
- Herramientas necesarias para implementar la IDE y desarrollarlas.

- La implementación gradual de un nodo IDE en cada una de las jurisdicciones, con sus respectivos municipios incluidos o como nodos independientes de acuerdo a la disponibilidad de recursos humanos y tecnológicos.
- El acceso libre y gratuito a la información geoespacial.

Se pretende consensuar entre las distintas organizaciones catastrales un único diccionario de datos, que permita un sistema interoperable de información territorial, a partir de la cual se asegura el intercambio de información generada por cada una de las instituciones. Para ello, la cartografía catastral identificará el objeto territorial legal, es decir, la parcela, a través de su ubicación física y su descripción geométrica individual.

4.1.2. Colombia, Catastro multipropósito

El problema en Colombia es originario de un patrón inadecuado de la ocupación y uso de la tierra. Muchos campesinos han identificado su parcela en lugares equivocados, teniendo debilidad en los derechos de esta propiedad, y se han formado atrasos en material social y económico conjuntamente con debilidades institucionales.

El Catastro multipropósito, (Guzman-Jiménez 2017) es la herramienta que permitirá la administración, gestión y gobernanza de las tierras rurales y tener el conocimiento de los predios y de sus tenedores. Permitirá tener en tiempo real toda la información de un bien inmueble y así evitar que existan varios propietarios o un propietario sin documentación acreditativa. Incorpora el análisis de cuatro variables:

- La económica para lograr estimar valores catastrales que reflejen de manera precisa las condiciones físicas y económicas de los bienes inmuebles.
- La identificación y descripción física y jurídica de los bienes inmuebles públicos y privados del país, bajo los estándares definidos y adoptados por la autoridad catastral.
- La jurídica que busca garantizar la anhelada interrelación catastro-registro y contar con una norma integradora y unificadora en estas materias. Esta variable es sin duda, una de las mayores problemáticas que tienen el sector de tierras en Colombia.
- La Institucional para lograr fortalecer la institucionalidad catastral para la implementación del catastro multipropósito y la adecuación de mecanismos para mejorar el acceso e interoperabilidad de la información sobre la tierra y la propiedad.

Para esta implementación del Catastro Multipropósito se diseñaron dos fases, una piloto del nuevo modelo en 11 municipios, la cual estaba prevista para el año 2016, y escalamiento a todo el territorio nacional entre 2017 y 2023. La meta a 2018 es conformar e implementar el catastro multipropósito en el 25 % del país (con énfasis en zonas rurales), y sentar las bases para completar el ejercicio nacional en 2023. El costo de esta política es

de \$ 2,6 billones y su implementación será liderada por Presidencia de la República, el Departamento Nacional de Planeación (DNP), el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), la Superintendencia Notariado y Registro (SNR) y la Agencia Nacional de Tierras (ANT).

El Catastro Multipropósito utiliza INTERLIS que es un lenguaje de esquema conceptual para la descripción de modelos especializado en modelos geoespaciales, puesto que incluye varios tipos de geometrías. El formato de transferencia de datos es el ITF o XTF. La principal ventaja es la "libertad de métodos". Es importante el soporte de los conceptos de Catastro 2014, especialmente en cuanto al manejo de la independencia temática con modelos por temas pero dentro de un mismo sistema de referencia; adicional a su flexibilidad para crear modelos de datos en general.

4.2. Softwares que apliquen el LADM

4.2.1. STDM - Social Tenure Domain Model

STDM (Griffith-Charles 2011) se basa en una plataforma de componentes de código abierto incluyendo PostgreSQL, PostGIS y QGIS. QGIS implementa la biblioteca geoespacial GDAL / OGR, lo que significa que más de 75 formatos vectoriales se pueden importar o exportar desde la base de datos STDM.

Esto incluye:

- Bases de datos espaciales PostGIS.
- Formatos de datos vectoriales OGR.
- Bibliotecas de Python geoespaciales.

El STDM es una "especialización" de la ISO aprobada por la LADM. En este contexto, la especialización significa que hay algunas diferencias, que están sobre todo en la terminología y en el área de aplicación. El desarrollo de LADM tuvo lugar en paralelo con el desarrollo de STDM como concepto y modelo, y que los desarrolladores principales de ambos modelos son los mismos o de apoyo del uno al otro. Cualquier forma de derecho, responsabilidad o restricción en un sistema formal se considera como una relación de tenencia social en STDM.

4.2.2. SOLA - Solutions for Open Land Administration

Las estructuras de datos subyacentes utilizadas por el software SOLA se basan en el Modelo de Dominio de Administración de Tierras (LADM).

El interés en el proyecto SOLA sigue aumentando y la FAO ha seguido apoyando al proyecto SOLA, mediante la asistencia de que disponen los países que desean aplicar las Directrices voluntarias sobre la gobernanza responsable de la tenencia (VGGT). En este nuevo contexto, SOLA es visto como un excelente ejemplo de una tecnología habilitadora que mejora la transparencia y la prestación de servicios en las agencias de administración de tierras - elementos clave para mejorar la gobernanza de la tenencia de la tierra. La Unión Europea ha ofrecido su apoyo a través de la VGGT financiando las versiones árabe, francesa y rusa de SOLA, así como el trabajo preliminar para la ampliación de la valoración de la propiedad en masa. Traducciones

españolas, portuguesas y chinas del software SOLA original (ahora llamado Registro) también están disponibles

El software SOLA permite un registro original para agencias de administración de tierras que requieren una solución de tenencia segura, robusta y transparente. Esto proporciona un registro integrado con sus respectivas funciones catastrales, gestión de casos y una base de datos compatible con LADM.

4.2.3. SIGIT - Sistema de Gestión Integral de Tierras

El Sistema de Gestión Integral de Tierras, SIGIT (Lemmen *et al.* 2013), es un proyecto piloto que está desarrollado en el marco del Programa URBAL III, Proyecto Gestión Integral de Tierras, con fondos de la Comunidad Europea y asesorado técnicamente por Kadaster de Holanda. El objetivo del sistema es formar una plataforma general para la gestión integral de tierras a nivel local con enlaces con las instituciones a nivel nacional. Actualmente está instalado y en pruebas en los países de Honduras y Guatemala. El SIGIT se caracteriza por:

- Integración de tenencia, uso y planificación de tierras
- Entorno controlado de flujos de trabajo (todo cambio es producto de una transacción, toda transacción es soportada por documentos, toda transacción es trazable hasta sus orígenes, el soporte de historia)
- Integración con otros aplicativos que usan a la unidad territorial como base de operación, haciendo uso de servicios WMS y WFS
- Uso del Land Administration Domain Model para la administración de tierras
- Uso de software fuente abierta

SIGIT funciona de la siguiente manera: los usuarios desde la plataforma web acceden a su municipio con un formulario de solicitud. En el caso de transacciones catastrales, esto incluye documentos notariales y que se pueden incluir como en el caso de una subdivisión. Desde el SIGIT, tras la recepción, la verificación y predicción de los datos de la transacción, se proporcionará un Certificado Catastral en papel. El usuario tomará el certificado, la escritura y (si es

necesario) el formulario al NPI (Instituto de Propiedad Nacional). El municipio enviará los datos de transacción digitalmente de SIGIT a SURE (Sistema Unificado de Registros). Entonces NPI puede comparar ambos conjuntos de datos (desde el usuario y desde SURE). Una transacción se procesará en SURE y el municipio será informado digitalmente después de la aprobación por el NPI de esta transacción en SURE.

5. Conclusiones

Los estudios planteados de la Reforma de la Ley Hipotecaria y a partir de la plataforma GeoDelProp con el software TopoDelProp, se ha conseguido finalizar un proyecto real de delimitación de una propiedad, obteniendo una validación gráfica catastral aceptada y unos resultados satisfactorios para el propietario.

El siguiente objetivo que se pretende alcanzar es utilizar la plataforma ATNL, como se ha mencionado anteriormente, para realizar una delimitación múltiple de fincas y comprobar si la delimitación de grupos de fincas ofrece ventajas. Se plantea una delimitación de entre 10 y 20 fincas colindantes.

Se debe reconocer el LADM como estándar ISO que inicia un desarrollo progresivo de nuevos catastros, integrados con los registros de la propiedad, es decir, a la integración organizacional (registros de la propiedad y oficinas de catastros), que generalmente están separados, contribuyendo también a disminuir las bases de datos redundantes.

Varios países como Colombia y Argentina, ya han personalizado el esquema LADM para sus necesidades: eliminando, editando o añadiendo nuevos elementos para establecer una norma consolidada entre elementos físicos (parcelas) y derecho. Se continua con la tendencia establecida de INSPIRE que sigue en la posición en que la parcela catastral es la descripción del ámbito espacial del derecho de propiedad, como se ha mencionado en el apartado 4, el Catastro ha de ser la base gráfica del Registro de la Propiedad.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido apoyado por los profesores Mora-Navarro, Femenia-Ribera, Martínez-Llario que pertenecen al departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universidad Politécnica de Valencia, España.

References

- ALKAN, M. and POLAT, Z.A., 2016. Design and development of LADM based infraestructura for Turkey. *Survey Review*, pp. 1–16.
- ATNL, 2017. Archivo Topográfico Nacional de Linderos. Available: <http://atnl.coigt.com/>
- BABALOLA, S.O., RAHMAN, A.A., CHOON, L.T. and VAN OOSTEROM, P.J.M., 2015. Possibilities of Land Administration Domain Model (LADM) implementation in Nigeria. Joint International Geoinformation Conference, II-2/W2, pp. 28–30.
- BERNÉ VALERO, J.L., FEMENIA RIBERA, C. and AZNAR BELLVER, J., 2004. *Catastro y Valoración Catastral*. 1ª edición. Editorial Universidad Politécnica de Valencia. Ref., pp. 532-574. ISBN: 84-9705-672-8.
- GEODELPROP, 2016. Available: <http://upvusig.car.upv.es/geodelprop/>
- GRIFFITH-CHARLES, C., 2011. The Application of the Social Tenure Domain Model (STDM) to Family Land in Trinidad and Tobago. *Land Use Policy*, 28(3), pp. 514–522.

- GUZMAN-JIMÉNEZ, L.F., 2017. El Catastro Multipropósito: Retos y oportunidades para el desarrollo rural. Available: <http://lasillavacia.com>
- INSPIRE, 2007. Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council of 14 March 2007 establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE). Available: <http://inspire.jrc.ec.europa.eu/>
- ISO/TC211, 2011. ISO 19152, Draft International Standard (DIS), Geographic information - Land administration domain model (LADM). Lysaker, Norway: ISO, 118 pages.
- JIAO, J., ZHANG, L. and HELO, P.T., 2006. Process platform representation based on Unified Modelling Language. *International Journal of Production Research*, **45** (2007), pp. 323–350.
- LEMMEN, C., KOERS, J. and CERRATO-ESPINAL, R., 2013. SIGIT: an Information System for Integral Approach of Land Management: an LADM Implementation in Honduras and Guatemala. 5th Land Administration Domain Model Workshop.
- MORA-NAVARRO, G., 2013. Diseño y desarrollo de un modelo de datos dinámico con software libre para la delimitación gráfica de las propiedades en España. Thesis, (PhD). Universidad Politécnica de Valencia.
- SIGIT, 2013. Sistema de Gestión Integral de Tierras. Available: <http://puertocortes.gob.hn/sigit/home.jsf>
- VELASCO MARTÍN-VARÉS, A., 2016. La norma ISO TC 211 19152, sobre el Modelo Catastral. Land Administration Domain Model (LADM). *Catastro* Nº **87**, pp. 7-33.
- ZHANG, C., LI, W., DAY, M.J. and PENG Z.R., 2011. GML-Based Interoperable Geographical Databases. *Cartography*, **32** (2003), pp. 1–16.

ANÁLISIS DE LA COLABORACIÓN CIENTÍFICA EN LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

ANALYSIS OF SCIENTIFIC COLLABORATION AT THE POLYTECHNIC UNIVERSITY OF VALENCIA

Arnau Fombuena

Department of Spatial Information Engineering, Namseoul University, 91 Daehak-ro, Seonghwan-eup, Seobuk-gu, Chungcheongnam-do, 331-707 Cheonan, South Korea. fombuena@nsu.ac.kr

Abstract:

The work presented in this paper is focused on employing maps for the visualization of the collaboration network of the Polytechnic University of Valencia (Spain). In this paper, a collaboration is understood as the scientific publications where at least one author is affiliated in the aforementioned university. Furthermore, a visual analysis using the maps created is performed with the goal of observing the proximity of the institutions collaborating with said university, the intensity of said collaborations, and supporting future decision-making processes for new research projects.

Key words: Geomatics, GIS, Higher Education

Resumen:

El trabajo presentado en este artículo se centra en la visualización de la red de instituciones con las que colabora la Universidad Politécnica de Valencia a través de mapas. Entendiendo como colaboraciones las publicaciones científicas en las que al menos un autor pertenece a dicha institución. Además, se expone un análisis visual mediante los mapas creados con el objetivo final de observar la proximidad de las instituciones colaboradoras con la universidad y la intensidad de las colaboraciones, que puedan servir de apoyo a la toma de decisiones para futuros proyectos de investigación.

Palabras clave: Geomática, SIG, Educación Superior

1. Introducción

La educación es un factor esencial para el desarrollo social y económico de la sociedad (Rumley *et al.* 2014). La educación superior en particular debe enfrentar nuevos desafíos y funciones que tradicionalmente no han sido interpretadas como propias. En este sentido, la Unión Europea (UE) se ha apoyado en la expansión de la implicación de las Instituciones de Educación Superior (IES) en la sociedad como pilar fundamental para desarrollar la sociedad del conocimiento (European Commission 2011). La estrategia europea *Horizon2020* (European Commission 2014) es una muestra significativa del aumento de la importancia de las IES y de la necesidad de comprender, gestionar, planificar y apoyar la toma de decisiones eficaz en el sector de la educación superior. Sin embargo, el actual ritmo acelerado de creación y almacenamiento de datos conlleva que la extracción de valor añadido sea un proceso complejo (Turi *et al.* 2013). Asimismo, los datos geoespaciales también han seguido esta tendencia y están ganando importancia convirtiéndose en *big data* por derecho propio, dando paso a la *big geo-data* (Sui 2014). Debido a la relevancia de los datos geoespaciales Naciones Unidas creó en 2011 el *United Nations Committee of Experts on Global Geospatial Information Management* (2014) con el objetivo de gestionar los múltiples desafíos que presenta la situación actual a nivel global en lo relativo a estándares, instrumentos legales, datos de infraestructuras espaciales, etc.

Autores como Goodchild y Janelle (2010) destacan la importancia de los patrones geoespaciales para mejorar los planes estratégicos y ven los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como la pieza esencial para aunar la perspectiva interdisciplinar. Otros autores como Jessop (2008) y Boonstra (2009) consideran indispensable la información geoespacial en el campo de las humanidades aunque reconocen la lenta adaptación de los SIG a las necesidades de la investigación en dicho campo. La propuesta de Esri (Sui 2014) para crear una Universidad Espacial centrada en explotar al máximo el potencial de las tecnologías geoespaciales representa una oportunidad para hacer de los SIG un elemento indispensable en las IES. Concretamente, esta propuesta se basa en cuatro aspectos principales:

1. Expandir el uso del *Spatial Thinking* (SP) como piedra angular de los planes de estudios. Varios autores (Bearman *et al.* 2015; Ellul 2015; Ferrandino 2015; Xie and Reider 2014) han realizado diversos estudios en los que concluyen que aprender SP contribuye a aumentar la probabilidad de encontrar empleo una vez acabados los estudios universitarios. Sobre todo para los estudiantes de carreras no técnicas.
2. Impulsar una línea de trabajo con formación geoespacial que sea capaz de aprovechar las oportunidades laborales asociadas con la tecnología geoespacial (Gewin 2004; US Department of Labor 2010).

3. Posibilitar e impulsar la investigación académica interdisciplinar tomando como referencia la perspectiva geoespacial.
4. Desarrollar *smart* campuses cuya gestión de recursos y espacios se vea reforzada con SIG.

Resumiendo, lo que se propone es incluir los SIG en los planes de estudios universitarios - más allá de aquellos específicamente centrados en la geomática-, promover la investigación con datos geoespaciales, mejorar la gestión de las universidades a través de los SIG y apoyar la toma de decisiones. Todo ello, integrando los SIG en la universidad de una forma similar a la estadística que, hoy en día, es indiscutible en muchísimos ámbitos, sean éstos científicos o no. Particularmente, la complejidad de los múltiples aspectos de la educación superior lleva a la necesidad de aportar mejoras a las limitaciones de la estadística (Pérez-Gómez 2012). Además, muchos de los estudios realizados en diversos campos presentan la información de un modo que frecuentemente resulta tan complicado como los propios estudios. Esta situación implica que dichos estudios no se exploten al máximo. En este sentido, la inclusión de los SIG es una evolución natural con el potencial de enriquecer los estudios típicamente estadísticos.

El contexto de la educación superior, debido a su complejidad y a sus enormes dimensiones, resulta especialmente exigente en la recopilación de datos, la gestión y el análisis de sus múltiples aspectos. Es por ello que ha habido algunas iniciativas para crear sistemas de apoyo al proceso de toma de decisiones en la educación superior empleando los SIG. Los tres sistemas brevemente descritos a continuación destacan significativamente:

1. Los responsables del sistema universitario del estado de Oregón (2004) y la *Oregon State University*, en los Estados Unidos de América, decidieron realizar un programa piloto llamado *Oregon State Board of Education Decision-Support Pilot Project* (OSBEDSPP). El objetivo era analizar datos demográficos y estadísticos con SIG para apoyar la toma de decisiones. Específicamente, para la financiación de las universidades y el desarrollo de la fuerza laboral.
2. Wang *et al.* (2009) desarrollaron un sistema en la *Peking University* con el objetivo principal de facilitar la transparencia del proceso de toma de decisiones al público en general. Además, a través de este sistema los investigadores y los responsables de toma de decisiones reciben de forma sencilla información de varias fuentes, que resulta útil para el desempeño de sus funciones.
3. Singleton *et al.* (2012) modelaron la participación en la Educación Superior con un modelado espacial interactivo conectado a la clasificación demográfica. El objetivo principal era poder observar la aplicación hipotética de diversas políticas. Particularmente, simulando cómo se vería afectada la participación y considerando cada institución y cada tipo de barrio.

Si bien estas iniciativas resultan interesantes es importante tener en cuenta que tienen un carácter altamente experimental y la expansión, o incluso el

conocimiento, de este tipo de sistemas todavía no se han desarrollado. Ésta última afirmación resulta evidente al observar la existencia de trabajos con el objetivo de apoyar la toma de decisiones que no utilizan los SIG. Por ejemplo, analizando tendencias educacionales por zonas y en una escala multitemporal (Smith and Smith 2014).

En particular, en este artículo se muestra la red de colaboradores de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) en el año 2015 a partir de datos obtenidos de la base de datos científica Scopus. El objetivo es doble: 1) visualizar a través de una red los colaboradores de la UPV para, después, realizar un análisis visual de dicha red. Este artículo sigue una estructura clásica pero efectiva para transmitir conocimiento científico y presenta la situación actual de los SIG en la educación superior. 2) Detallar el método utilizado para satisfacer el objetivo propuesto.

A continuación, se presenta el método seguido y los resultados para, finalmente, exponer las conclusiones obtenidas.

2. Método

Para conseguir la realización del objetivo se requieren datos de artículos científicos. A través de la colaboración entre autores en publicaciones científicas se deriva la colaboración científica entre las entidades a las que dichos autores pertenecen. Para obtener la red de instituciones que colaboran con la UPV se han tomado aquellas publicaciones en las que al menos un autor pertenece a la UPV.

Las publicaciones científicas están accesibles a través de las webs de las revistas que los publican así como en bases de datos científicas. Visitar todas y cada una de las revistas científicas existentes resultaría complicado y tedioso. En su lugar, se ha accedido a las publicaciones a través de las bases de datos científicas.

Existen muchas bases de datos científicas. Pero hay dos consideradas de mayor calidad, la Web of Science (WoS) y Scopus, porque indexan las revistas con mejor reputación que, además, cumplen con el sistema de revisión por pares para asegurar la calidad de los artículos publicados.

Entre la base de datos de la WoS y la de Scopus se ha elegido la segunda. El motivo de esta elección reside en que la base de datos de la WoS es sustancialmente más restrictiva debido a que únicamente incluye aquellas revistas que han sido previamente indexadas por *Clarivate Analytics* (antes *Thomson Reuters*) y que, por tanto, han recibido un factor de impacto y han sido clasificadas en una de sus múltiples categorías. La base de datos de Scopus es más completa, porque además de las revistas incluidas en la WoS también incluye otras revistas que cumplen con una serie de criterios establecidos por Elsevier (n.d.), propietaria de Scopus, para garantizar la calidad y relevancia de dichas revistas. Es por ello que Scopus ofrece una visión más amplia de la ciencia que la WoS. Cabe destacar, que hasta 1996 aproximadamente la WoS ofrece una base de datos más completa pero a partir de esa fecha Scopus ofrece mejores resultados.

Una vez obtenidos los datos necesarios de Scopus, se ha creado una matriz numpy en la que se han

almacenado el número de colaboraciones entre cada par de instituciones. Dichas colaboraciones se han calculado por pares de forma que si en un artículo científico participan tres autores *a*, *b*, *c* pertenecientes a tres instituciones *x*, *y*, *z*, las colaboraciones resultantes serán las de la institución *x* con *y*, la institución *x* con *z* y la institución *y* con *z*. De esta forma, se obtendrá una red con forma poligonal para cada artículo en el caso de que participen tres o más instituciones. En el caso de que únicamente participen dos instituciones se obtendrá una línea de colaboración uniendo ambas instituciones.

Para visualizar las colaboraciones, se ha empleado ArcGIS. Con este software se ha creado una geodatabase en la que se ha almacenado una capa de puntos que contiene las instituciones a las que están afiliados los autores que firman las publicaciones científicas. Dichas instituciones se han geolocalizado previamente de forma automatizada empleando Python. Además, también se han limpiado los datos con el fin de evitar la aparición de instituciones duplicadas y corregir las coordenadas erróneas. Es decir, se han modificado las coordenadas de las instituciones que no hayan sido geolocalizadas correctamente. Además, se ha revisado y corregido el tipo de institución en los casos oportunos. La simbología de las instituciones en la capa de puntos se ha creado de modo que el color de cada punto sea distinto para cada tipo de institución. En la geodatabase también se ha creado una capa de líneas que une las instituciones que colaboran en la producción científica. La simbología de dichas líneas, concretamente el grosor, representa el número de colaboraciones entre cada par de instituciones.

3. Resultados

La matriz de colaboraciones tiene unas dimensiones de 1091 x 1091. Es decir, el total de instituciones que colaboran con la UPV es de 1091 que generan, en conjunto, un total de colaboraciones - a partir de las publicaciones científicas de la UPV indexadas en Scopus en el año 2015 - de 8304 (Fig. 1).

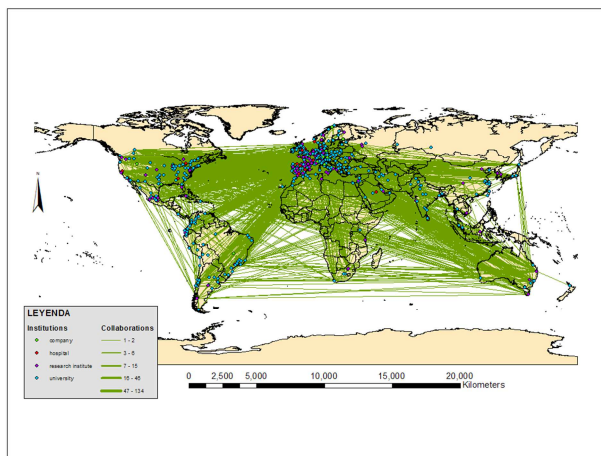


Figura 1: Red de colaboraciones generada a partir de publicaciones de la UPV en 2015.

El total de colaboraciones entre universidades y empresas generadas a partir de las publicaciones científicas de la UPV indexadas en Scopus en el año 2015 es de 357 (Fig. 2).

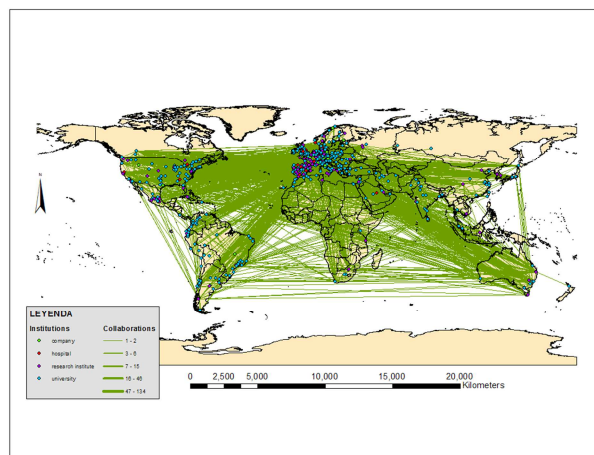


Figura 2: Red de colaboraciones entre universidades y empresas generada a partir de publicaciones de la UPV en 2015.

El total de colaboraciones entre universidades y hospitales generadas a partir de las publicaciones científicas de la UPV indexadas en Scopus en el año 2015 es de 266 (Fig. 3).

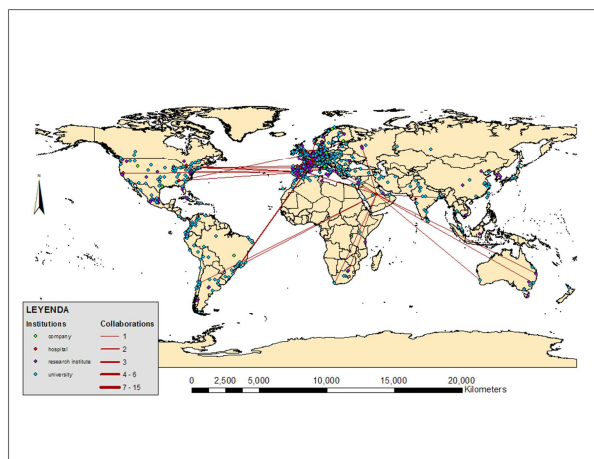


Figura 3: Red de colaboraciones entre universidades y hospitales generada a partir de publicaciones de la UPV en 2015.

El total de colaboraciones entre universidades y empresas generadas a partir de las publicaciones científicas de la UPV indexadas en Scopus en el año 2015 es de 2400 (Fig. 4).

El total de colaboraciones únicamente entre universidades generadas a partir de las publicaciones científicas de la UPV indexadas en Scopus en el año 2015 es de 2616 (Fig. 5).

4. Conclusiones

En este artículo se han mostrado las colaboraciones científicas de la Universidad Politécnica de Valencia en el año 2015 con otras instituciones. Para ello se han tomado datos de publicaciones en revistas científicas y se han extraído las colaboraciones de autores pertenecientes a distintas instituciones a partir de las publicaciones de la UPV. Además, se han explicitado dichas colaboraciones a través de mapas para, finalmente, realizar un análisis visual.

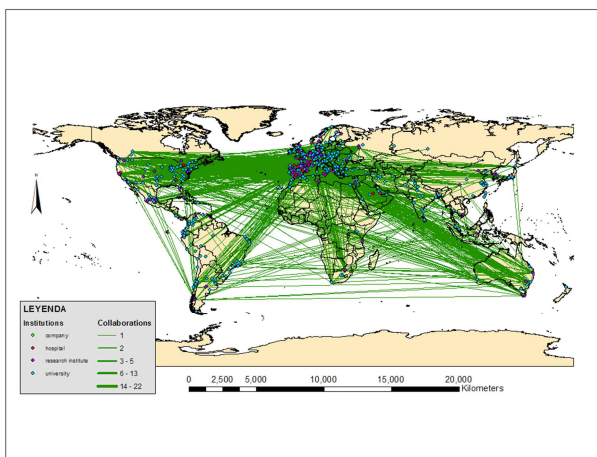


Figura 4: Red de colaboraciones entre universidades e institutos de investigación generada a partir de publicaciones de la UPV en 2015.

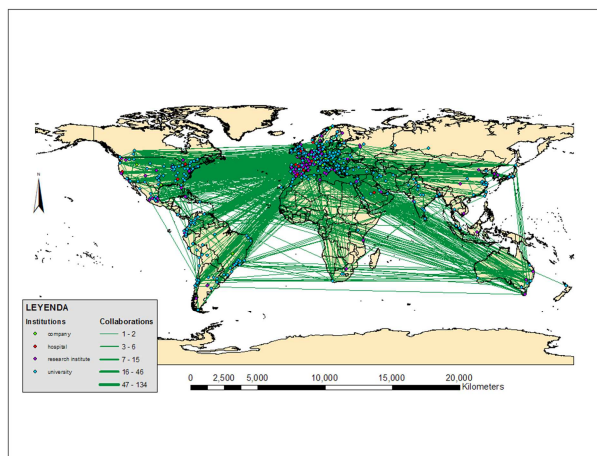


Figura 5: Red de colaboraciones únicamente entre universidades generada a partir de publicaciones de la UPV en 2015.

De los resultados del análisis visual se obtiene que la UPV colabora principalmente con otras universidades y con institutos de investigación. Aunque la UPV también colabora con empresas y hospitales, dichas colaboraciones son mucho más reducidas que en los dos casos citados anteriormente. Si bien, comparativamente, el número de colaboraciones con empresas es relativamente bajo, destaca su distribución geográfica en todos los continentes. El escaso número de colaboraciones con empresas y hospitales puede deberse a la naturaleza de las publicaciones científicas. Muchas empresas tienen interés en desarrollar productos y servicios pero no tanto en publicarlos en revistas científicas. Del mismo modo, los hospitales buscan soluciones que no necesariamente publican en revistas científicas. De hecho, las publicaciones científicas de los hospitales provienen, a menudo, de los institutos de investigación de los propios hospitales, por

lo que se contabilizan en esa categoría. También cabe destacar que la colaboración de la UPV con hospitales asiáticos, así como con los de la gran mayoría de países africanos, es inexistente.

Respecto a la distribución geográfica, la UPV colabora con instituciones que están localizadas, mayoritariamente, en Europa. La UPV también colabora con muchas instituciones del continente americano, tanto en el norte como en el sur. En el sur las colaboraciones son principalmente con universidades, mientras que en el norte el tipo de instituciones con las que se relaciona la UPV es más variado, con una presencia mayor de institutos de investigación, hospitales y empresas. En el continente africano las colaboraciones están focalizadas en el norte y en el sur con prácticamente ninguna colaboración en el resto del continente. Muchos países de oriente medio están también representados en la red de colaboraciones de la UPV. Respecto a Asia, las colaboraciones se reparten entre la India y China con algunas colaboraciones en países del sudeste asiático, Japón y Corea del Sur. En la zona de Oceanía las principales instituciones del continente también son colaboradoras de la UPV. Estas instituciones están localizadas, en su mayoría, en la costa este de Australia.

La intensidad de las colaboraciones con otras instituciones es muy moderada, con un volumen medio de colaboraciones por institución de 1,3 colaboraciones independientemente del tipo de institución. Sin embargo, las instituciones que más colaboran con la UPV son la Universidad de Valencia, con 134 colaboraciones y la Universitat Jaume I, con 46 colaboraciones. Ambas superan con creces el volumen medio comentado anteriormente. Esto ratifica que la primera ley de la geografía (Tobler 1970) se cumple en esta red de colaboraciones y que todo está relacionado entre sí, pero la relación es más intensa entre aquello que está más próximo.

Para terminar, es significativo mencionar que en caso de utilizar datos de la WoS los resultados serán distintos. Para obtener resultados óptimos lo ideal sería emplear datos de ambas bases de datos, la de la WoS y la de Scopus, para después cruzarlos y evitar duplicidades. Sin embargo, Scopus ofrece una visión suficientemente completa para observar tendencias a nivel global.

Reconocimientos

Este artículo se presenta como parte de las actividades obligatorias en el programa de Doctorado en Geomática en la Universidad Politécnica de Valencia con el fin de publicitar los avances en la tesis doctoral, en este caso, dirigida por el profesor Jesús Manuel Palomar Vázquez del Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría de la misma universidad.

References

BEARMAN, N., MUNDAY, P., and MCAVOY, D., 2015. Teaching GIS outside of geography: a case study in the School of International Development, University of East Anglia. *Journal of Geography in Higher Education*, 39(2). DOI: 10.1080/03098265.2015.1010146.

- BOONSTRA, O.W.A., 2009. No place in history geo-ICT and historical science. In Scholten, H.J., van de Velde, R. & van Manen, N. *Geospatial technology and the role of location in science*, pp. 87-101, Dordrecht, NL: Springer.
- ELLUL, C., 2015. Geography and Geographical Information Science: interdisciplinary integrators. *Journal of Geography in Higher Education*, **39**(2), pp. 191-194. DOI: 10.1080/03098265.2015.1039797.
- ELSEVIER, n.d.. Content Policy and Selection. Available: <https://www.elsevier.com/solutions/scopus/content/content-policy-and-selection> [5/1, 2017].
- EUROPEAN COMMISSION, 2011. Modernisation of higher education in Europe: funding and the social dimension. Education, Audiovisual and Culture Executive Agency Eurydice. ISBN: 978-92-9201-205-2.
- EUROPEAN COMMISSION, 2014. Horizon 2020 in brief. The EU Framework Programme for Research & Innovation. Publications Office of the European Union, Luxembourg. ISBN: 978-92-79-33057-5. Available: <http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/h2020-section/europe-changing-world-inclusive-innovative-and-reflective-societies> [2/20, 2015].
- FERRANDINO, J., 2015. Using GIS to apply learning across the undergraduate criminal justice curriculum. *Journal of Criminal Justice Education*, **26**(1), pp. 74-93. DOI: 10.1080/10511253.2014.925567.
- GEWIN, V., 2004. Mapping Opportunities. *Nature*, **427**, pp. 376-377. DOI: 10.1038/nj6972-376a.
- GOODCHILD, M.F., and JANELLE, D.G., 2010. Toward critical spatial thinking in the social sciences and humanities. *GeoJournal*, **75**, pp. 3-13. DOI: 10.1007/s10708-010-9340-3
- JESSOP, M., 2008. The Inhibition of Geographical Information in Digital Humanities Scholarship. *Literacy and linguistic computing* **23**, pp. 39-50. DOI: 10.1093/lc/fqm041
- OREGON STATE BOARD OF EDUCATION, 2004. GIS Decision Support Pilot Project. Technical Summary. Available: <http://www.oregon.gov/ccwd/word/stateboard.doc> [12/14, 2014].
- PÉREZ-GÓMEZ, R., 2012. Analyzing and mapping key issues in higher education systems with geo-information related technologies. *4th International Conference on Cartography and GIS, Vol. 1*. Albena, June 18-22. Available: http://www.cartography-gis.com/docsbca/Book_Proceedings%201_2012.pdf [11/12, 2014].
- RUMBLEY, L.E., STANFIELD, D.A. and DE GAYARDON, A., 2014. From inventory to insight: making sense of the global landscape of higher education research, training, and publication. *Studies in Higher Education*, **39**(8), pp. 1293-1305. DOI: 10.1080/03075079.2014.949546.
- SINGLETON, A.D., WILSON, A.G., and O'BRIEN, O., 2012. Geodemographics and spatial interaction: An integrated model for higher education. *Journal of Geographical Systems*, **14**, pp. 223-241. DOI: 10.1007/s10109-010-0141-5.
- SMITH, G., and SMITH, T., 2014. Targeting educational disadvantage by area: continuity and change in urban areas in England 1968-2014. *Oxford Review of Education*, **40**(6), pp. 715-738. DOI: 10.1080/03054985.2014.981436.
- SUI, D., 2014. Opportunities and impediments for Open GIS. *Transactions in GIS*, **18**(1), pp. 1-24. DOI: 10.1111/tgis.12075.
- TOBLER, W., 1970. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*, **46**(2), pp. 234-240. DOI: 10.2307/143141.
- TURI, K.N., CHRISTOPH, M.J., and GRIGSBY-TOUSSAINT, D.S., 2013. Spatial distribution of underweight, overweight and obesity among women and children: Results from the 2011 Uganda demographic and health survey. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **10**(10), pp. 4967-4981. DOI: 10.3390/ijerph10104967.
- UNITED NATIONS COMMITTEE OF EXPERTS ON GLOBAL GEOSPATIAL INFORMATION MANAGEMENT, 2014. About UN-GGIM. Available: <http://ggim.un.org/about.html> [3/1, 2015].
- U.S. DEPARTMENT OF LABOR, 2010. Employment and Training Administration - High growth industry profile – Geospatial Technology. Available: http://www.doleta.gov/BRG/Indprof/geospatial_profile.cfm [10/14, 2015].
- WANG, A., GUO, W., XU, G., JIA, J., and WEN, D., 2009. GIS-Based Educational Decision-Making System. 2009 *IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services*, GSIS 2009, pp. 1198-1202.
- XIE, Y., and REIDER, D., 2014. Integration of Innovative Technologies for Enhancing Students' Motivation for Science Learning and Career. *Journal of Science Education and Technology*, **23**, pp. 370-380. DOI: 10.1007/s10956-013-9469-1.

APLICACIÓN DE ÍNDICES DE FORMA EN LA DETERMINACIÓN DE POLÍGONOS SLIVERS DERIVADOS DE LAS DIMENSIONES LINEALES DE UNA FIGURA Y SU ÁREA

APPLICATION OF SHAPE INDICES TO THE CHARACTERIZATION OF SLIVERS POLYGONS USING THE LINEAR DIMENSIONS OF A FIGURE AND ITS AREA

Miguel Sánchez Marco*, Áurea Gallego Salguero

Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, Valencia 46022. msanchma@cgf.upv.es; augalsal@cgf.upv.es

Abstract:

Nowadays cartography is more and more required by users, companies and government agencies. A lot of tasks need digital, updated and quality cartography: Civil work design, planning, landscaping, environmental impact, conservation, etc. This need of cartography is mostly solved by spatial data infrastructures and map servers that make downloading and getting maps easy. Later, using Geographical Information Systems (GIS) it is quite easy to perform queries and geoprocessing operations in order to get valuable information which is difficult to get with other tools. However slivers polygons are a serious problem. They can alter the results in spatial analysis, queries and map portray. A map with sliver polygons is a map with false polygons and therefore with errors. We need to remove them. Removing sliver polygons is simple once they have been located. The real problem is to manage to locate them. Some sliver polygons are small, others are large but in both cases sliver polygons are difficult to locate and tell them apart from other polygons. Scientists have used formulas to calculate the shape of objects for many years. Today there are dozens of formulas available that could be used in the characterization and location of polygons slivers. In this article many of these shape formulas are analyzed and conclusions are drawn on whether they can be used in locating sliver polygons.

Key words: Geographical Information Systems, Sliver polygons, Form indices, Area, Perimeter, Linear dimensions

Resumen:

Hoy en día la cartografía es cada vez más demandada por usuarios, empresas y agencias gubernamentales. Muchas tareas necesitan cartografía digital, actualizada y de calidad: diseño de obra civil, planificación, paisajismo, impacto ambiental, conservación, etc. Esta necesidad de cartografía se resuelve principalmente mediante infraestructuras de datos espaciales y servidores de mapas que facilitan la descarga y la obtención de mapas. Utilizando los Sistemas de Información Geográfica (SIG) es muy fácil realizar consultas y operaciones de geoprocésamiento para obtener información valiosa que es difícil de obtener con otras herramientas. Sin embargo, los polígonos sliver son un problema serio, ya que pueden alterar los resultados en análisis espacial, consultas y representación de mapas. Un mapa con polígonos sliver es un mapa con polígonos falsos y, por lo tanto, con errores y tienen que ser eliminados. La eliminación de polígonos sliver es simple una vez que se han localizado, ya que el verdadero problema es lograr localizarlos. Algunos polígonos sliver son pequeños, otros son grandes, pero en ambos casos los polígonos sliver son difíciles de localizar y distinguirlos de otros polígonos. Los científicos han usado fórmulas para calcular la forma de los objetos durante muchos años. Hoy en día hay disponibles docenas de fórmulas que se podrían usar en la caracterización y localización de polígonos slivers. En este artículo se analizan muchas de esas fórmulas de forma y se obtienen conclusiones sobre si pueden ser utilizadas en la localización de polígonos sliver.

Palabras clave: Sistemas de información geográfica, polígonos slivers, índices de formas, área, perímetro, dimensiones lineales

1. Introducción

Los polígonos slivers son polígonos que se generan cuando los contornos de los polígonos no son coincidentes en su trazado. Estos polígonos se suelen generar normalmente cuando se superponen dos cartografías y los contornos de los polígonos no coinciden exactamente (Fig. 1). También se presentan cuando se digitaliza el mismo contorno dos veces para polígonos adyacentes y sus bordes no coinciden (Fig. 2).

Los polígonos slivers suponen un problema serio que afecta a los resultados en el análisis espacial, a las consultas en los Sistemas de Información Geográfica (SIG) o en la representación de mapas, siendo necesario eliminarlos de la base de datos.

La propagación de errores en el análisis de superposición ha sido estudiada por diversos autores (Shi *et al.* 2004; Veregin 1989). La aparición de estos polígonos origina que el usuario disponga de una cartografía con polígonos falsos y, por tanto, con

* Corresponding Author: Miguel Sánchez Marco, msanchma@cgf.upv.es

errores. Por lo tanto, es necesario que cualquier cartografía esté libre de estos polígonos erróneos (Maraş *et al.* 2010).

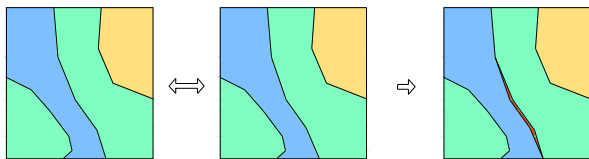


Figura 1: Superposición de elementos superficiales: generación de slivers.

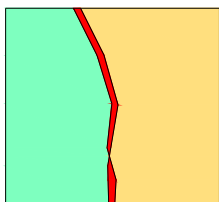


Figura 2: Digitalización: generación de slivers.

Para evitar que se generen polígonos slivers, durante la operación de superposición, existen técnicas que tratan los bordes de los polígonos como si fueran líneas fuzzy (las líneas tienen posición variable dentro de una tolerancia Épsilon (ϵ) prefijada, de modo que, si dos líneas caen dentro de una misma zona de tolerancia, ambas líneas se unen) (Klajnsek and Zalík 2005; Chrisman 1983).

Para evitar generar polígonos slivers durante la digitalización o compilación se debe emplear técnicas adecuadas. Por ejemplo, es recomendable hacer una digitalización topológica en vez de una digitalización en spaghetti, siendo necesario emplear técnicas de snap que permitan forzar nuestras coordenadas a puntos anteriormente digitalizados (Chrisman 1987).

Todas estas técnicas buscan evitar que aparezcan polígonos slivers en la cartografía. Pero en ocasiones esto es inevitable, bien porque nos proporcionan una cartografía que ya los tiene o, pese a utilizar tolerancias o anchuras epsilon, éstas no han sido suficientes. Aumentar el tamaño de la tolerancia no es la solución, ya que se simplifica peligrosamente la representación gráfica. Además, es difícil cifrar el tamaño correcto de esa tolerancia, ya que en un SIG podemos tener objetos de digitalización precisa (edificios, embalses, carreteras, etc.) junto a otros elementos cuyos bordes son menos precisos (bosques, tipos de suelo, etc.). Por todo lo visto anteriormente, suele ser bastante habitual que las bases de datos gráficas de los SIG tengan polígonos slivers, sobre todo las procedentes de la superposición de capas.

2. Características de los polígonos slivers

Los polígonos slivers son elementos especiales con formas muy variadas y formadas por diversos motivos. Se puede decir que, generalmente, los polígonos slivers presentan las siguientes características:

- El área suele ser pequeña, sobre todo con respecto a sus vecinos.
- Suelen presentar ángulos muy agudos.

- Los polígonos slivers suelen estar compuestos únicamente por dos arcos, mientras que esto no es habitual en el resto de polígonos.
- Los slivers suelen presentar cuatro arcos en un nodo, mientras que lo normal, en otros polígonos, es tres.
- Presentan correlación espacial. Un sliver suele tener polígonos slivers conectados y suelen hacerlo en ángulos agudos.
- Alternancia de atributos. (al superponer dos polígonos y los bordes no coinciden se generan polígonos sliver en cadena, perteneciendo un sliver a uno de los polígonos y el siguiente al otro de los polígonos).
- Suelen tener gran elongación (relación ancho/largo).
- Presentan mucho perímetro frente al área que generan.

3. Índices de forma derivados de las dimensiones lineales de una figura y su área en la determinación de polígonos slivers

Existe una gran variedad de métodos con sus respectivos índices para medir la forma.

Diversos autores han buscado en los índices de forma las siguientes características (Austin 1984; Moellering and Rayner 1981; Moellering and Rayner 1982; Griffith 1982):

- Regeneración de la forma original desde un índice de forma.
- Independencia de la escala.
- Independencia de la traslación de la figura.
- Independencia del punto de partida de la figura.
- Independencia de la rotación de la figura.
- Independencia del sistema de coordenadas empleado en la digitalización de la figura.
- Correspondencia uno a uno del índice resultante y la figura.

Stoddart (1965) añade las siguientes características:

- Medidas significativas de la forma en sí, más que de sus subpropiedades.
- Fácil de calcular.
- Que se pueda expresar en términos de un índice simple.

Este índice puede ser fácilmente reestablecido en términos de forma.

La proliferación de un número tan grande de índices de forma se debe a que es imposible definir completamente una forma con un simple índice, como lo demuestra Lee and Sallee (1970). Sin embargo, sí es posible cuantificar alguno de los aspectos de la forma (elongación, compactación). Tal como demuestran Blott and Pye (2008) y Krumbein (1941) es posible utilizar índices de

forma para describir, comparar y cuantificar características simples de las formas. En este sentido, los índices de forma pueden servir perfectamente para detectar polígonos slivers.

Son índices que utilizan conceptos sobradamente conocidos, como la anchura y la altura de las figuras. Según Frolov (1975), fue Vereschchagin (1930) quien propuso medir la elongación de una figura mediante el cociente del eje más largo por el eje más corto, ambos en direcciones perpendiculares, véase Ec. (1).

$$I_1 = \frac{l}{w} \quad (1)$$

Cuya imagen es $[1, \infty)$, 1 para el círculo, cuadrado o cualquier otra figura donde $w=l$, e ∞ para la recta. Otros autores, como Folk (1968), citan la inversa del anterior índice como un buen medidor de la elongación de partículas en petrología, véase Ec. (2):

$$I_2 = \frac{w}{l} \quad (2)$$

Donde ahora la imagen es $(0, 1]$, con 0 para la recta y 1 en las figuras donde $w = l$.

También existe una variante de la anterior, véase Ec. (3):

$$I_3 = \sqrt{I_2} = \sqrt{\frac{w}{l}} \quad (3)$$

Davis (2002) llama índice de forma de grano a la relación entre el perímetro de la figura y la longitud de su eje más largo, véase Ec. (4):

$$I_4 = \frac{P}{l} \quad (4)$$

Cuya imagen es $(2, \pi)$, donde 2 corresponde con un polígono en forma de recta y los valores grandes los consiguen los polígonos pequeños con mucho perímetro (muy enrollados).

En 1932 Horton utiliza el índice siguiente, véase Ec. (5):

$$I_5 = \frac{A}{l^2} \quad (5)$$

Cuya imagen es $(0, \frac{\pi}{4})$, donde 0 corresponde a la recta y $\frac{\pi}{4}$ al círculo.

En 1927 Pentland obtiene el siguiente índice, como resultado del cociente del área de la figura entre el área de un círculo con diámetro igual al eje más largo de la figura l , véase Ec. (6):

$$I_6 = \frac{4A}{\pi l^2} \quad (6)$$

Cuya imagen es $(0, 1]$, donde 0 corresponde a la recta y 1 al círculo.

En 1965 Haggett utiliza la fórmula de Pentland (1927), en la forma $\frac{1.27A}{l^2}$. Años antes, Schumm (1956), obtiene la siguiente fórmula, calculando el cociente del diámetro de un círculo que tiene la misma área de la figura de estudio, entre la longitud del eje más largo de la figura, véase Ec. (7):

$$I_7 = \frac{d_c}{l} = \frac{2\sqrt{A}}{l} \quad (7)$$

que es la fórmula de Pentland dentro de la raíz cuadrada y cuya imagen es también $(0, 1]$.

Son varios los autores los que argumentan la inutilidad de estos índices en la descripción de la forma (Folov 1975; MacEachren 1985; Austin 1984; Stoddart 1965). Se puede decir que los índices que utilizan la longitud o anchura de los polígonos a lo largo de ejes rectos, presentan un gran problema para detectar slivers, tanto los que no son rectilíneos como los que tienen formas normales. En la Figura 3 puede verse como dos slivers, con similares características en cuanto a área y perímetro, presentan valores muy distintos en cuanto a la longitud.

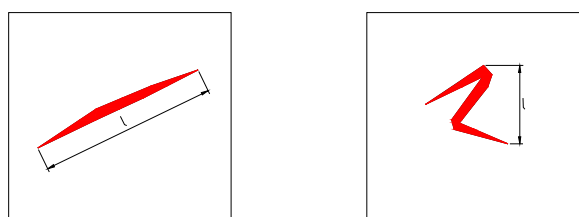


Figura 3: Slivers con la misma área y perímetro pero con distinta longitud.

En cambio, estos índices pueden jugar un buen papel cuando lo que buscamos son slivers con la forma clásica, alargada y rectilínea que muestra la figura anterior. Solo en este caso las conclusiones siguientes deben ser tenidas en cuenta. Cuando los slivers son rectilíneos y alargados, prácticamente todos los índices pueden ayudar a detectarlos. De hecho, Austin (1984) afirma que muchas de las diferencias que muestran muchos de estos índices no son más que un factor de escala.

4. Aplicación de los índices

En este apartado se va analizar el comportamiento de los índices de forma, derivados de las dimensiones lineales de una figura y su área, aplicados a una serie de polígonos con características y formas diferentes, siendo conocidas sus dimensiones lineales y áreas (Tabla 1).

Las nomenclaturas utilizadas para los diversos parámetros de los índices de estos polígonos son los siguientes:

- A: Área
- P: Perímetro
- l: Longitud eje largo figura
- w: Perpendicular

Las fórmulas utilizan la anchura y longitud, relacionadas entre ellas o con el área o el perímetro. Los índices empleados son los anteriormente definidos, van desde I_1 al I_7 .

Con respecto a los seis índices anteriores, se ha hecho una clasificación dependiendo de las imágenes, obteniendo cuatro casos.

En el primer caso corresponde al índice I_1 , que tiene una imagen con los valores de $[1, \infty)$ siendo el 1 para el círculo, cuadrado o cualquiera otra figura, e ∞ para la recta (Tabla 2).

Tabla 1: Características geométricas de los polígonos analizados.













	Área (m ²)	Perímetro (m)	l (m)	w (m)
	1567	844	275	125
	2.5	7.8	3.3	1.6
	58.9	236.6	117.8	0.5
	2400	616	300	8
	2400	616	88	76
	21955	2064	1560	408







Tabla 2 : Datos obtenidos en el cálculo de los índices derivados de las dimensiones lineales de una figura y su área. Para valores de $[1, \infty)$.

	l_1
	2.2
	2.06
	235.6
	37.5
	1.158
	3.824

Cuanto más largo y estrecho sea el polígono mayor será el resultado, como ocurre en el tercer polígono a la vista de los resultados. En cambio, en los polígonos con formas más compactas, redondeados, incluso triangulares, doblados etc. el resultado se acerca más a 1, como ocurre en el segundo y quinto polígono.

En el segundo caso, la imagen tiene unos valores de $(0, 1]$, donde el 1 corresponde al círculo y el 0 a la recta. Esta imagen se corresponde con los índices l_2, l_3, l_6, l_7 . En la Tabla 3 se observan los valores para estos índices.

Tabla 3: Datos obtenidos en el cálculo de los índices derivados de las dimensiones lineales de una figura y su área. Para valores de $(0, 1]$.

	l_2	l_3	l_6	l_7
	0.454	0.674	0.026	0.162
	0.484	0.696	0.292	0.540
	0.004	0.065	0.005	0.073
	0.026	0.163	0.034	0.184
	0.864	0.929	0.395	0.628
	0.262	0.511	0.0114	0.107







Se puede observar que los valores más cercanos a 1 se corresponden con los polígonos que tienen cierta forma

triangular y están doblados, como es el caso del segundo y quinto polígono. Por lo tanto, podemos decir que este tipo de fórmulas presentan un buen rendimiento para los polígonos muy estrechos y alargados, como es el caso del tercer polígono.

En el tercero de los casos, la imagen que se utiliza es la correspondiente a $(2, \pi)$ para el índice l_4 , donde el 2 corresponde a la recta y π al círculo.







En la Tabla 4 se observa que el valor más cercano a 2 es el correspondiente al tercero de los polígonos, siguiendo a continuación el cuarto de ellos. El segundo de los polígonos se acerca también a este valor, debido a que su perímetro está muy cercano al doble de su longitud.

Tabla 4: Datos obtenidos para el cálculo de los índices derivados de las dimensiones lineales de una figura y su área. Para valores de $(2, \pi)$.

	l_4
	3.069
	2.363
	2.008
	2.053
	7
	1.323

En el cuarto caso se utiliza una imagen $(0, \pi/4)$ para el índice l_5 , donde el 0 corresponde a la recta y $\pi/4$ al círculo (Tabla 5).

Tabla 5: Datos obtenidos para el cálculo de los índices derivados de las dimensiones lineales de una figura y su área. Para valores de $(0, \pi/4)$.

	l_5
	0.0207
	0.229
	0.0003
	0.0266
	0.3099
	0.0092

En el índice l_5 el polígono más cercano a 0 es el tercero ya que tiene un área relativamente pequeña con respecto a su longitud.

Estas dos últimas fórmulas usan la relación entre el perímetro, área de la figura y su longitud referida al eje más largo.

5. Conclusiones de la aplicación de los índices

En el apartado anterior se han aplicado diversos índices a una serie de polígonos habituales en la cartografía vectorial. La respuesta de cada uno de los índices a cada polígono es diferente, como cabía esperar. No obstante, como se ha visto, existen casos particulares de polígonos en los cuales los índices arrojan valores un tanto inesperados.

A continuación, se presenta una tabla resumen con los resultados del estudio de los seis polígonos característicos utilizados en el apartado anterior. En ellas se indica para cada índice el resultado obtenido. Este resultado se ha codificado de tres formas, con la leyenda siguiente: B (índice adecuado), NR (no recomendable) y M (índice no adecuado). Cuando decimos que un índice es adecuado (B) para una forma particular de polígono, es debido a que el índice detecta con el valor numérico obtenido la forma (alargada, redondeada, etc.) que tiene el polígono.

Si un índice indica con el valor numérico obtenido, dentro de su imagen de valores, que el polígono es alargado cuando en realidad no lo es, calificamos ese índice para un polígono como no adecuado (M).







Por último, si el índice da un valor intermedio dentro de su imagen, que no nos permite decantarnos por ninguna forma en concreto, calificamos al índice para esa forma de polígono como no recomendable (NR).

Para los índices de forma derivados de las dimensiones lineales y su área obtenemos se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 6.

No hay ningún índice de las tablas anteriores que obtenga una clasificación adecuada para todos los polígonos. Todos los índices tienen una calificación M en alguno de los polígonos, siendo el que presenta islas en su interior es el que peor calificación obtiene. Este tipo de polígonos se caracteriza por tener unas dimensiones, tanto en alto como ancho, considerables; su forma es redondeada, pero su área se ve reducida por la existencia de los polígonos islas que contiene en su interior. No obstante, su perímetro aumenta considerablemente, ya que debe computarse el perímetro exterior, así como el perímetro de las islas de

su interior. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el propósito es ver si se puede usar alguno de estos índices para detectar polígonos slivers. Los polígonos slivers no suelen presentar polígonos con islas en su interior, por lo que se podría utilizar esta característica para diferenciar slivers de no slivers sin utilizar ningún índice de forma de los utilizados anteriormente.

(Tabla 6: Resultados de los índices de las dimensiones lineales y su área.

	I_1	I_2	I_3	I_6	I_7	I_4	I_5
	NR	B	NR	B	B	NR	B
	B	NR	B	NR	NR	NR	M
	B	B	B	B	B	B	B
	B	B	B	B	B	B	B
	M	M	M	B	NR	M	B
	B	M	NR	M	M	B	M

Todos los índices han dado un resultado positivo para los polígonos estrechos y alargados, que tienen poca área y mucho perímetro, siendo estas características propias de los polígonos slivers. Estos polígonos suelen tener gran elongación (relación ancho/largo) y además presentan mucho perímetro frente al área que generan. Esto no quiere decir que todos los polígonos que tengan esta forma sean slivers, por ejemplo un camino suele presentar mucho perímetro con respecto a su área, sin que deba de ser considerado un polígono sliver.

En futuros trabajos se plantea la utilización de otro tipo de índices que clasifique de forma más eficaz los polígonos en slivers o no slivers, para poder establecer estadísticamente unas cifras o umbrales, a partir de los cuales determinar qué polígonos son slivers con una probabilidad alta.

La detección de los polígonos slivers es un proceso complejo y necesario para dotar a la cartografía de consistencia topológica, necesaria para llevar a cabo determinadas operaciones de análisis espacial en SIG.

References

- AUSTIN, R.F., 1984. *Measuring and comparing two-dimensional shapes*, pages 293-312. Netherlands: Springer.
- BLOTT, S.J., and PYE, K., 2008. Particle shape: a review and new methods of characterization and classification. *Sedimentology*, **55**(1), pp. 31-63.
- CHRISMAN, N.R., 1983. Epsilon filtering: a technique for automated scale changing. *In 43 rd Annual Meeting of the American Congress on Surveying and Mapping*, pp. 322-331.
- CHRISMAN, N.R., 1987. Efficient digitizing through the combination of appropriate hardware and software for error detection and editing. *International Journal of Geographical Information Science*, **1**(3), pp. 265-277.
- DAVIS, J.C., 2002. *Statistics and Data Analysis in Geology*. New York: (third ed.) John Wiley & Sons Inc. 638 pages.
- FOLK, R.L., 1968. *Petrology of sedimentary rocks*. Texas: Hemphill Publishing Company.
- FROLOV, Y.S., 1975. Measuring shape of geographical phenomena: A history of the issue. *Soviet geography: Review and Translation*, **16**(10), pp. 676-687.
- GRIFFITH, D.A., 1982. Geometry and Spatial Interaction. *Annals of the Association of American Geographers*, **72**(3), pp. 332-346.

- HAGGET, P., 1965. *Locational Analysis in Human Geography*. London: Arnold.
- HORTON, R., 1932. Drainage basin characteristics Transactions of the American. *Geophysical Union*, **13**, pp. 350-361.
- KLAJNSEK, G. and ZALIK, B., 2005. Merging polygons with uncertain boundaries. *Computers & Geosciences*, **31**(3), pp. 353-359.
- KRUMBEIN, W.C., 1941. Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, **11**, pp. 64-72.
- LEE, D.R. and SALLEE, G.T., 1970. A Method of Measuring Shape. *Geographical Review*, **60**(4), pp. 555-563.
- MACEACHREN, A.M., 1985. Compactness of Geographic Shape: Comparison and Evaluation of Measures. *Geografiska Annaler. Series B, Human Geography*, **67**(1), pp. 53-67.
- MOELLERING, H. and RAYNER, J.N., 1981. The Harmonic Analysis of Spatial Shapes Using Dual Axis Fourier Shape Analysis (DAFSA). *Geographical Analysis*, **13**, pp. 64-77.
- MOELLERING, H. and RAYNER, J.N., 1982. The Dual Axis Fourier Shape Analysis of Closed Cartographic Forms. *The Cartographic Journal*, **19**, pp. 53-59.
- PENTLAND, A., 1927. A method of measuring the angularity of sands. *In Proceedings and Transactions of the Royal Society of Canada*, **21**.
- SCHUMM, S.A., 1956. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at perth amboy. *Bulletin of the Geological Society of America*, **67**(5), pp. 597-646.
- SHI, W., CHEUNG, C.K. and TONG, X., 2004. Modelling error propagation in vector-based overlay analysis. *ISPRS Journal of Photogrametry and remote Sensing*, **59**(1), pp. 47-59.
- MARAŞ, H.H., AKTUĞ, B., MARAŞ, E.E., and YILDIZ, F., 2010. Topological error correction of GIS vector data. *International Journal of the Physical Sciences*, **5**(5), pp. 476-483.
- STODDART, D.R., 1965. The shape of atolls. *Marine Geology*, **3**(5), pp. 369-383.
- VEREGIN, H., 1989. *Accuracy of Spatial Database*. London: Taylor & Francis, pp. 3-18.
- VERESHCHAGIN, G., 1930. *Methods of lake Morphometry*. Ekspeditsii, part II Geography.

CIGeo

Geodesia y Geofísica

ANÁLISIS DE SISMICIDAD ASOCIADA AL LLENADO DE EMBALSES. CASO DEL CENTRO DE PRODUCCIÓN DE PIRRÍS (COSTA RICA)

ANALYSIS OF RESERVOIR TRIGGERED SEISMICITY. CASE OF PIRRIS RESERVOIR (COSTA RICA)

Sandra Ruiz-Barajas^{a*}, Guillermo E. Alvarado^b, Belén Benito Oterino^a, Álvaro Climent^b

^a Dpto. Ingeniería Topográfica y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, Crta de Valencia km 7, 28031, Madrid, España.
sandra.ruizb@upm.es

^b Area de Amenazas y Auscultación Sismológica y Volcánica, Instituto Costarricense de Electricidad, San José, Costa Rica

Abstract:

The presented work is the result of a new collaboration between the Costa Rican Institute of Electricity (ICE) and the Technical University of Madrid (UPM) for the investigation of induced seismicity issues. Triggered seismicity associated with the filling of artificial water reservoirs is known since six decades ago. However, it is the case of triggered seismicity more complicated to model their effects. More than 100 cases of reservoir induced/triggered seismicity have been collected around the world and this issue continues today being a research topic of great importance. Indeed, new developments and contributions are constantly being made with the aim of achieve a better understanding of their characteristics and genesis.

The main aim of the presented work is to analyze the spatial-temporal evolution of the seismic events recorded around the Pirrís reservoir before, during and after its filled. With the analysis of the seismic events we try to know and control the influence of the reservoir operations on the seismic activity of the area. Different parameters are studied, using methodologies proposed by different authors, in order to explain the possible effects of reservoir filling in changing the stress conditions in the environment and to detect any possible anomaly. Moreover, some analysis have been done in order to find a possible correlation between the water level in the reservoir and the evolution of the seismic activity recorded.

Overall, the results of this study will provide important conclusions about the sensitivity of certain parameters to evaluate and model the effects of filling reservoirs on the seismic activity in the vicinity and we will present the spatial-temporal evolution of the seismicity associated with the specific case of the Pirrís hydraulic project.

Key words: Seismicity, Reservoir, Geophysics, Seismic hazard

Resumen:

El trabajo presentado es el resultado de una colaboración iniciada entre el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) para la investigación de la sismicidad inducida por causas antrópicas. La sismicidad disparada por el llenado de grandes embalses es un hecho conocido desde hace décadas, siendo uno de los tipos de sismicidad más complejos a la hora de modelizar sus efectos. Hasta ahora, más de 100 casos de sismicidad disparada por embalses han sido recogidos en todo el mundo, por lo que el tema de la sismicidad inducida se ha convertido en una línea de investigación cada vez más importante y estudiada.

El objetivo principal de este trabajo se centra en analizar la evolución espacio-temporal de la sismicidad registrada en los alrededores del embalse de Pirrís (Costa Rica) en tres fases: antes, durante y después de su llenado. Con dicho análisis se pretende conocer y controlar la influencia que las operaciones efectuadas en el embalse tienen en la actividad sísmica de la zona. Se han estudiado diferentes parámetros sísmicos y se ha analizado su variación en el tiempo (diferenciando entre las tres fases temporales citadas con el objetivo final de explicar los posibles efectos que el llenado del embalse puede tener en las condiciones de esfuerzos en el entorno. Además, se incluye un primer análisis cualitativo para identificar la posible correlación entre las variaciones del nivel de agua en el embalse y la evolución de la actividad sísmica registrada.

En este trabajo se presenta un detallado análisis de la evolución espacio-temporal de la sismicidad asociada con el caso específico del proyecto hidráulico Pirrís. En general, los resultados presentados (aunque todavía provisionales) proporcionan una idea sobre la sensibilidad de ciertos parámetros para evaluar y modelar los efectos del llenado de embalses sobre la actividad sísmica del entorno.

Palabras clave: Sismicidad, Embalse, Geofísica, Peligrosidad sísmica

* Corresponding Author: Sandra Ruiz Barajas, sandra.ruizb@upm.es

1. Introducción

El trabajo que se presenta es el resultado de una colaboración iniciada entre el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) para la investigación de la sismicidad inducida por causas antrópicas. La ocurrencia de sismos asociados a ciertas actividades humanas, es un hecho observado y reconocido desde hace décadas. No obstante, los casos de sismicidad inducida se han incrementado en los últimos años debido al aumento de proyectos en los que se actúa sobre el medio natural, alterando su estado de esfuerzos.

Diferentes actividades humanas pueden desencadenar la ocurrencia de sismos: explotación de minas, extracción de hidrocarburos convencionales o no convencionales, almacenamiento subterráneo de CO₂ para evitar su difusión a la atmósfera, sistemas de obtención de energía geotérmica, inyección de gas en el subsuelo para su almacenamiento, llenado de grandes embalses, etc. Son numerosos los adjetivos que se pueden encontrar en la literatura especializada para describir a este tipo de sismicidad asociada a actividades humanas. Algunos de los términos más utilizados son: sismicidad *man-made*, inducida, artificial, disparada, anticipada, etc.

Determinar si la sismicidad de una zona es de tipo natural o ha podido ser inducida por la modificación de los estados de esfuerzos del medio por alguna actividad antrópica en la región, no es una tarea fácil. Un factor que complica la identificación de la naturaleza de un terremoto es la dificultad de discernir su pertenencia a una serie sísmica.

Se entiende por sismicidad propiamente natural aquella que se asocia a la energía liberada por las fallas preexistentes en un área, orientadas de acuerdo a la sismotectónica regional y local de una zona.

Cuando se trata de la sismicidad asociada a actividades antrópicas, es crucial diferenciar entre la sismicidad relacionada directamente con la introducción de una energía extra en el sistema, que sería propiamente la sismicidad «inducida», o la sismicidad provocada en una falla próxima o estructura tectónica capaz de generar terremotos, lo que constituiría la sismicidad «disparada o anticipada». En general, cuanto más energía se aporta al sistema, mayor es la sismicidad inducida (número de sismos y tamaño de los mismos), y cuanto más activa es una región, más propensa es a la generación de nuevos eventos tectónicos.

En el caso de la sismicidad inducida propiamente dicha, el cese de la actividad humana de aporte de energía conllevaría el cese de la sismicidad inducida (quizá con un cierto tiempo de retraso). Los sismos inducidos suelen ser de magnitud baja o muy baja (incluso de magnitud negativa).

En el caso de la sismicidad disparada o anticipada, la alteración del estado local de esfuerzos, en especial sobre una falla próxima y cercana a la culminación de su ciclo sísmico (esto es, en un estado críticamente tensionado) puede adelantar la ocurrencia de un sismo que en una situación natural (sin actividad humana de por medio) ocurriría más tarde. Así, un pequeño cambio de esfuerzos (de un bar), podría dar lugar a la generación de un sismo mucho mayor. En este caso la

actividad antrópica acelera la ocurrencia de sismos que eventualmente podrían haber ocurrido de forma natural mas tarde.

Algunos autores (McGarr and Simpson 1997) sostienen que la sismicidad asociada con actividades de extracción o inyección de fluidos se clasifica como un tipo de sismicidad inducida mientras que los sismos asociados al llenado o vaciado de embalses serían de naturaleza anticipada (*Reservoir Triggered Seismicity, RTS*) (ICOLD, *International Commission On Large Dams*). Este trabajo se centra precisamente en el análisis de éste último tipo de sismicidad. Se presenta un primer análisis espacio-temporal de los eventos sísmicos registrados en los alrededores de una de las obras del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), el Centro de Producción (CP) de Pirris. Se ha analizado la información sismológica *antes, durante y después* del llenado del embalse, con el objetivo principal de poder ver la posible afectación que la operación de llenado ha tenido sobre las condiciones sismotectónicas de la zona e identificar la posible ocurrencia de sismicidad disparada en las proximidades. Éste primer análisis ha permitido encontrar diferentes indicadores que evidencian cambios en el patrón de sismicidad antes y después del llenado del embalse.

2. Sismicidad disparada por embalses (RTS)

Se entiende por sismicidad disparada por embalses (*Reservoir Triggered Seismicity, RTS*) la distribución temporal y espacial de eventos sísmicos cuyo origen está asociado con las operaciones de un embalse. Se trata por tanto de una sismicidad que surge de manera anómala durante y después del llenado de un embalse (ICOLD 2004).

Algunas de las características diferenciadoras de este tipo de sismicidad son:

- Los sismos suelen agruparse en *clusters* alrededor del embalse.
- Los sismos suelen ser muy superficiales. Aunque se ha documentado algún caso de RTS con profundidades de 25 km (Kebeasy *et al.* 1987)
- En la mayoría de los casos, la sismicidad empieza poco después del comienzo del llenado y crece conforme aumenta el nivel de agua en el reservorio.
- La mayor parte de eventos disparados identificados hasta ahora, se asocian con fallas de mecanismo normal o de desgarre. Son menos los casos observados de RTS asociados con fallas de tipo inverso.

Además, deben existir ciertas condiciones geológicas e hidrogeológicas especiales para el disparo de sismos en la zona, como es la existencia de fallas activas que se encuentren próximas a un estado de rotura en los alrededores del embalse.

La sismicidad entorno al embalse puede dispararse fundamentalmente por dos causas:

- El propio peso de la masa de agua. Ésto provoca cambios de esfuerzos estáticos en el medio, de forma inmediata tras el llenado del embalse, pues aumenta la presión sobre el fondo del embalse.
- El efecto de la propagación de la presión de poros por el medio. Consiste en el aumento de la presencia de agua en los poros y su difusión por las

zonas permeables que existan por debajo y en los alrededores del embalse. Ésto produce un cambio drástico en las condiciones hidrológicas de la zona.

Son diferentes las clasificaciones que se pueden encontrar en la literatura y que hacen referencia a la sismicidad asociada a las operaciones en grandes embalses (Talwani 1997b; Simpson *et al.* 1988; Gupta 2002). Una de las interpretaciones más extendidas (Simpson *et al.* 1988) sostiene que una respuesta inducida instantáneamente después del llenado (*rapid response*) es debida principalmente al peso de agua añadida, mientras que una respuesta retardada en el tiempo (*Delayed response*) está relacionada con una más lenta propagación de la presión de poros.

2.1. Antecedentes

La sismicidad disparada por embalses (RTS) es un fenómeno conocido desde la década de 1930 y se ha considerado un factor importante que puede afectar a las condiciones físicas del medio. El primer caso reportado ocurrió en el embalse Mear (EE.UU) creado por la presa Hoover. Sin embargo, no fue hasta la década de los 60 cuando este tema cobró mayor importancia, tras la sismicidad registrada en las proximidades de la presa de Xinfengjiang (China) y Koyna (India), donde se alcanzaron magnitudes superiores a 6.0, produciéndose importantes daños estructurales en ellas y consecuencias graves (Gupta 2002).

Existen otros casos en zonas altamente sísmicas, en los que la sismicidad del entorno ha provocado el fallo de presas e importantes daños estructurales en ellas, como por ejemplo la presa de Sefid Rud (Irán) o la presa de Shih Kang (Taiwan). Por tanto, mantener un monitoreo sismológico en este tipo de estructuras es fundamental para el control de su seguridad. Esta instrumentación permite determinar el comportamiento dinámico de la misma y eventualmente activar alarmas que ayuden a la rápida acción de medidas de emergencia, para evitar efectos y consecuencias sobre la propia estructura y su funcionamiento y, con ello, sobre la población y sus actividades socio-económicas relacionadas.

Dado que los posibles eventos asociados con las operaciones de un embalse suelen ser de magnitud moderada, no suelen suponer un problema para el comportamiento de la presa, pues normalmente estas se diseñan para soportar eventos de mayor magnitud (sobre todo en zonas altamente sísmicas). No obstante, en ciertos casos, la sismicidad inducida puede afectar a los edificios y estructuras situadas en las proximidades de la presa que presentan una mayor vulnerabilidad y con ello un mayor riesgo a tener algún tipo de daño. Por ello, el control de la sismicidad en el entorno es además fundamental para la seguridad y tranquilidad de la población en la zona.

3. Inclusión de la sismicidad inducida para la evaluación de la peligrosidad sísmica

El aumento del número de sismos sentidos por la población e inducidos por diferentes causas antrópicas está haciendo que haya cada vez más trabajos centrados en analizar la forma de incluir este tipo de

sismicidad en un estudio de peligrosidad sísmica y conocer cual es su repercusión en la estimación del movimiento final esperado.

En un estudio tradicional de peligrosidad PSHA (*Probabilistic Seismic Hazard Assessment*) se determina la probabilidad de excedencia de un cierto nivel de movimiento para un largo periodo de tiempo. Para ello se parte del catálogo de terremotos históricos e instrumentales y se hace uso de modelos zonificados o de modelos de fallas con sus correspondientes leyes de recurrencia. En este tipo de estudios se determina la peligrosidad o movimiento esperado para plazo de tiempo medio-largo.

Sin embargo, en un estudio probabilista considerando sismicidad inducida PISHA (*Probabilistic Induced Seismic Hazard Assessment*), lo que se pretende es estimar la peligrosidad a corto plazo (días, horas o meses), pues lo que interesa es el seguimiento de la serie sísmica y sus cambios en función del tiempo nada más comenzar la inyección de fluidos o la causa de esa sismicidad.

A diferencia de la actividad debida a terremotos de origen natural y tectónico, la sismicidad inducida no puede ser tratada como una actividad estacionaria en el tiempo, tal y como se asume en un estudio probabilista de peligrosidad clásico (PSHA), donde se considera que la tasa de ocurrencia de terremotos es constante, siguiendo un modelo temporal poissoniano homogéneo para cada zona sísmica. En la metodología PISHA (Ec. 1) se considera que los valores de b y la tasa de sismicidad son variables con el tiempo, cobrando además especial importancia los terremotos de bajas magnitudes. Estos cambios de planteamiento entre el enfoque PSHA y PISHA (Ec. 2) se reflejan de este modo en la integral de peligrosidad:

$$E_i(A > A_0) = \alpha_i \int_M \int_R \int_\epsilon I[A > A_0 | m, r, \epsilon] f(m) f(r) f(\epsilon) dm dr d\epsilon \quad (1)$$

$$E_i(A > A_0) = \int_T \int_M \int_R \int_\epsilon \alpha_i(t) I[A > A_0 | m, r, \epsilon] f(m, b_i(t)) f(r) f(\epsilon) dt dm dr d\epsilon \quad (2)$$

Dónde:

- A: representa el parámetro de movimiento con el que expresamos la peligrosidad (habitualmente aceleración pico PGA, o aceleración espectral SA (T)).
- A0: es el valor fijado de movimiento cuya excedencia se evalúa.
- Alfa: es la tasa anual de ocurrencia de sismos y se considera constante dentro de una misma fuente.
- $f(m)$: se refiere a la función de densidad de probabilidad de la magnitud dentro de cada fuente. Describe la probabilidad de que ocurra un terremoto de una determinada magnitud en la fuente sísmica y representa directamente el denominado efecto de la fuente.
- $f(r)$: se refiere a la función de densidad de probabilidad de la distancia. Describe la probabilidad de que si se produce un terremoto en la fuente, su foco se encuentre a una distancia r del emplazamiento de cálculo. Esta función representa

la posible localización de un sismo dentro de la fuente sísmica y se relaciona con el efecto de la atenuación del movimiento a lo largo del trayecto entre la fuente y el emplazamiento.

- $f(\epsilon)$: está relacionada con la función de densidad de probabilidad asociada a la incertidumbre del movimiento que puede registrarse en el emplazamiento debido a un sismo determinado. Así, dadas una magnitud m y una distancia r , cabe esperar distintos niveles de movimiento dada la aleatoriedad del mismo, que se considera mediante una distribución log normal de y en base a observaciones empíricas. El parámetro ϵ indica precisamente el número de desviaciones estándar que se consideran para estimar y .
- $I[A > A_0 | m, r, \epsilon]$: es un término de probabilidad que refleja si se produce o no excedencia del nivel de movimiento prefijado al calcular el movimiento esperado para unas variables, m y r , determinadas. Es por tanto un término que toma dos valores: 1 cuando sí se produce excedencia y 0 en caso contrario.
- La integral triple se extiende al rango de variación de las tres variables (m, r y ϵ) y se resuelve numéricamente, dado que en la mayor parte de los casos no existe solución analítica. Sumando la contribución de todas las zonas se obtiene la tasa anual de excedencia del movimiento o peligrosidad sísmica expresada en términos anuales.
- El parámetro t representa el tiempo y solo aparece en el la Ec. (2) para el caso de PISHA

Hasta ahora, son diferentes los trabajos que se pueden encontrar en la literatura referentes a la inclusión de sismicidad inducida por diferentes causas antrópicas en un estudio probabilista de peligrosidad. Convertito *et al.* (2012) describen un análisis de peligrosidad sísmica probabilista dependiente del tiempo para sismicidad inducida (ISHA), combinando los datos y características de la sismicidad inducida por la inyección y extracción de fluido con un modelo de movimiento fuerte local. Por otro lado, Bourne *et al.* (2015) plantea una serie de consideraciones a tener en cuenta en la evaluación de la peligrosidad sísmica incluyendo sismicidad inducida. Recientemente, se ha publicado el mapa de peligrosidad para el centro y oeste de Estados Unidos incluyendo la sismicidad inducida por las actividades petroleras de la zona (Petersen *et al.* 2017)

Según sea la actividad antrópica que influya en la sismicidad de una zona, habrá que considerar un enfoque diferente para su inclusión en el cálculo, ya que el mecanismo por el cual se inducen los terremotos es diferente para cada tipo de actividad antrópica. Para la estimación de la peligrosidad sísmica se deben incluir, además de las características tectónicas, los parámetros propios de la actividad antrópica (operaciones de inyección, llenado, etc)

Entre los principales aspectos identificados por diferentes autores a tener en cuenta para la inclusión de la sismicidad inducida en un estudio de peligrosidad sísmica cabe destacar:

- Magnitud mínima: Tradicionalmente en un estudio PSHA clásico se suele fijar como magnitud mínima

$M = 5$, ya que sismos por debajo de esta magnitud no suelen generar daños. Sin embargo los eventos inducidos pueden ser de menores magnitudes y se producen, en general, a profundidades más superficiales, por lo que pueden causar movimientos fuertes del terreno a distancias epicentrales más cortas. Hasta ahora no se tiene un conocimiento preciso de la magnitud mínima capaz de causar daños para este tipo de eventos y por tanto que puedan contribuir a la peligrosidad sísmica.

- Magnitud máxima esperada: Es una de las cuestiones más discutidas y a la que, por el momento, no se ha llegado a ningún tipo de consenso.
- Valor del parámetro b : Son diferentes los estudios en los que se ha visto que el valor de b en casos de sismicidad inducida tiende a tener valores mayores, próximos a 2, frente a los casos de sismicidad natural o tectónica, en los que la pendiente de la recta de GR representada por el parámetro b suele ajustarse a valores del orden de 1.0.
- Modelo de movimiento fuerte: Se deben utilizar modelos que cubran rangos de magnitudes bajas así como distancias hipocentrales cercanas para considerar la sismicidad superficial inducida por las operaciones humanas.
- Efecto sitio.

4. Caso de estudio: C.P. Pirrís

El C.P. Pirrís, localizado en Costa Rica, en la zona del Pacífico Central, es uno de los 11 centros de producción hidroeléctricos pertenecientes al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). Se encuentra en una zona montañosa en donde diferentes estudios geológicos han demostrado la existencia de fallamiento activo en los alrededores del embalse (*Informe 2006, Red sísmológica para el P.H. Pirrís*). Por ello, es importante monitorear y controlar la ocurrencia de sismicidad en torno al embalse, en especial aquella que pueda ser provocada por el llenado del mismo.

Se trata de una presa de gravedad construida con concreto compactado con rodillo (RCC), de 113 m de altura, 266 m de longitud y con la cresta a la elevación de 1208 msnm, que crea un embalse de regulación mensual. Este centro de generación hidroeléctrica tiene una capacidad de generación de 130 MW. Consta, además de la presa, de un túnel de conducción de 11 km de longitud y una casa de máquinas. El embalse tiene un volumen de $36 \times 10^6 \text{ m}^3$, se extiende por 3,5 km en sentido E-W y 1,2 km en sentido N-S, con una profundidad máxima de unos 80 m (Barquero and Alvarado 2012). En la Tabla 1 se resumen las principales características del embalse.

El embalse, cuyo llenado se completó en el año 2011, es de tipo estacional. Ésto significa que, durante un periodo de 4 a 6 meses, coincidentes con la estación lluviosa, se acumula agua para ser utilizada en el posterior periodo estacional seco. (*Informe área de Ingeniería Hidráulica*, ICE agosto 2012).

Con el fin de controlar el comportamiento de las diferentes estructuras del C.P. Pirrís, se han ido colocando desde la fase constructiva de la presa (año 2009) distintos instrumentos de medición para realizar

tanto controles de tipo estructural como geotécnico, los cuales continúan realizándose ahora en fase de operación.

Tabla 1: Resumen de las principales características del embalse de Pirris

<i>Año de inicio</i>	2011
Área del embalse	114 Ha
Volumen total	36 hm ³
Cota máxima	1205 msnm
Cota mínima	1160 msnm
Caudal promedio anual	9.8 m ² /s
Tipo de regulación	Estacional
Prof. Máxima	80 m

4.1. Contexto tectónico

La Planta de Pirris se encuentra en una zona tectónicamente compleja. La sismicidad en sus alrededores está asociada principalmente a dos tipos de fuentes: por un lado, la sismicidad generada por la zona de subducción y por otro, la sismicidad generada por fallamiento local (Fig. 1).

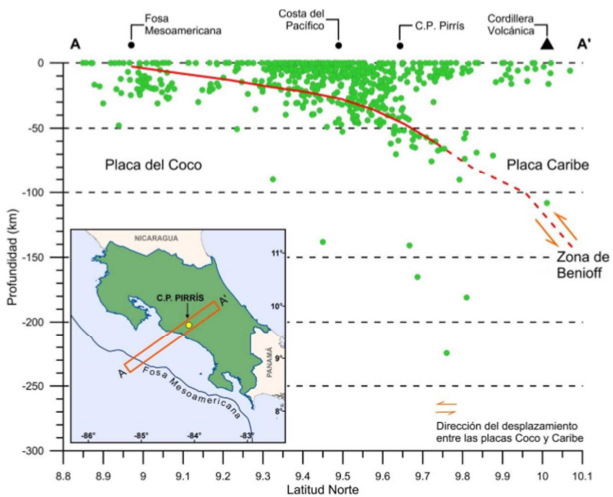


Figura 1: Perfil de la zona de subducción (Imagen tomada de Informe PH Pirris, 2012).

El primer tipo de sismicidad está asociada al proceso de subducción de la placa del Coco bajo la placa Caribe, que se extiende en profundidad desde la fosa hacia el interior del país, hasta la conocida "zona de Benioff."

Los esfuerzos compresivos generados por el proceso de subducción entre ambas placas, originan en la zona del Pacífico Central del país, un complejo sistema de fallas de carácter regional, predominantemente de tipo inverso, a nivel de la corteza continental (Tabla 2). De ellas la más importante es la llamada "Falla Longitudinal de Costa Rica", localizada principalmente en la región del Pacífico Central y Sur de Costa Rica.

El segundo tipo de sismicidad existente en los alrededores del embalse, se asocia con la tectónica y fallas locales. Este tipo de sismos se producen por los esfuerzos internos propios de la placa, o pueden ser sismos disparados o inducidos, producidos por actividad

antropogénica, como la asociada a embalses y presas. Existen diferentes trabajos y estudios sobre el análisis sismo-tectónico de las fuentes sísmicas asociadas con fallamiento local de la zona del Pacífico Central. La información tectónica proviene principalmente de los estudios geológico-tectónicos de Mora (1984), Barquero *et al.* (2001), Denyer *et al.* (2003) y Barquero and Climent (2006), aunque por el momento no existe ningún estudio específico reciente para las fallas más cercanas al embalse de Pirris. Por tanto no se tiene la información suficiente como para modelizarlas como fuentes independientes, pues no conocemos su geometría, valores de *slip rates*, etc.

Tabla 2: Principales fallas regionales del Pacífico Central

Falla	Tipo	Longitud mínima (km)
Longitudinal	Inversa	Mayor a 200
Damas	Inversa	25
Tierras Morenas	Inversa	10
La Faralla	Inversa	15
Paquita	Inversa	20
Naranja	Inversa	12
Pirris-Pagolín	Normal	16
Quepos	Normal-dextral	10

Algunas de las fallas locales que se encuentran dentro de la zona de estudio atraviesan el embalse de Pirris, cortándolo en sentido NW-SE y NE-SW, principalmente (Fig. 2). Todas ellas son de longitudes pequeñas, no alcanzándose en casi ningún caso longitudes mayores a 5 km (Tabla 3). Con estas longitudes, se ha realizado una estimación utilizando la relación de Wells and Coppersmith (1994) para conocer cuál es la magnitud máxima esperada en cada falla suponiendo que rompiera en toda su longitud. La falla con el potencial para generar el mayor sismo en la zona es la falla de Zapote con una M_{max} 5.8 (M_w), pues es la falla de mayor longitud. Le sigue la falla de San Rafael, con una magnitud máxima M_w 5.7. Cabe también destacar la falla La Isla con una M_{max} estimada de 5.4, la cual cruza longitudinalmente el embalse.

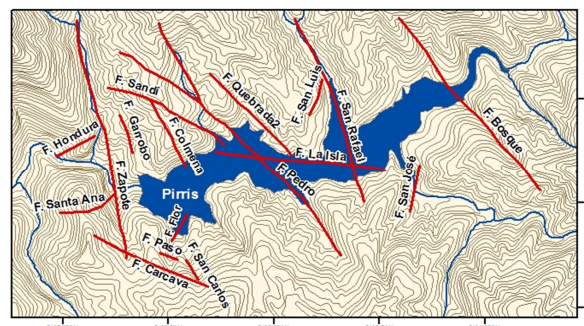


Figura 2: Distribución espacial de las trazas de las fallas locales en el embalse de Pirris.

Históricamente, no se tienen registros de sismos que hayan sido originados por fallas locales cercanas (menos de 25 km) al P.H. Pirris; solo se han presentado terremotos cuya fuente ha sido el proceso de

subducción de la placa del Coco bajo la placa Caribe, siendo el más importante el de 1952 de magnitud 7,0, que alcanzó una intensidad máxima de VII en la parte central interior de Costa Rica (Montero and Climent 1990).

Tabla 3: Principales fallas locales

Nombre	Tipo	Rumbo	L (km)	Mmax
Zapote	Dextral	350	8	5.8
Garrobo	Dextral/normal	340	0.8	4.7
Colmena	Dextral	340	2.4	5.2
Sandí	Dextral	140	2.6	5.3
Pedro	Dextral/normal	310	0.6	4.6
Quebrada2	Dextral	320	2	5.2
San Luis	Normal	30	0.8	4.7
Bosque	Rumbo	330	3.6	5.4
San José	Normal	10	0.9	4.8
Cárcava	Dextral	300	1.4	5.0
San Carlos	Normal	330	1.8	5.1
Paso	Inversa	110	0.4	4.4
Flor	Sinestral	15	0.6	4.6
La Isla	Normal	100	3	5.4
San Rafael	Sinestral	150	6	5.7

4.2. Actividad y operaciones en el embalse

Tras finalizar la construcción de la represa, el 9 de marzo de 2011 se iniciaron las operaciones de llenado del embalse, alcanzándose el nivel máximo el día 16 de Agosto de ese mismo año. Tras su llenado, los niveles de agua en el embalse han ido variando, siguiendo una tendencia más o menos cíclica (Fig. 3) con diferentes disminuciones del nivel medio del agua en diferentes épocas de los sucesivos años, coincidiendo normalmente con los meses de julio y agosto que es cuando se presenta una disminución relativa de la precipitación y suele coincidir con el llamado "Veranillo". Concretamente, en julio de 2015, se produjo un desembalse con el objetivo de revisar el túnel de conducción. Muchas de estas fluctuaciones en el nivel de agua pueden tener repercusión en la sismicidad de la zona, hecho que se intentará analizar y cuantificar en futuros análisis.



Figura 3: Variación diario del nivel de agua en el embalse.

4.3. Datos sísmicos. Red sismológica local

La red sismológica local de Pirrís fue instalada en febrero de 2008, antes de que se empezara con el llenado del embalse, para poder monitorear así la actividad sísmica un tiempo antes del llenado del

mismo, y poder comparar esa actividad con la que podría ser disparada tras el llenado.

Originalmente, la red constaba de 6 estaciones, ampliándose en 2013 con la instalación de tres nuevas estaciones, consiguiendo así una mejor cobertura de la zona de influencia (Fig. 4).

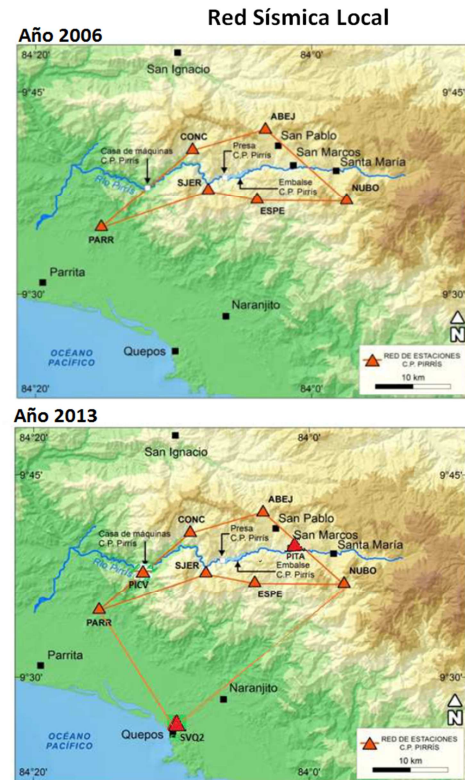


Figura 4: Evolución de la red sísmica local: red original (año 2006) y su densificación en 2013 con la instalación de tres nuevas estaciones (año 2013).

Además de la red sismológica local, desde septiembre de 2011, se cuenta con un sistema de monitoreo acelerográfico en el sitio de la presa para controlar el comportamiento dinámico de la estructura y garantizar su seguridad actual ante la ocurrencia de posibles sismos. La red acelerométrica consta de 7 acelerógrafos ubicados en diferentes niveles del cuerpo de la presa (Fig. 5) que registran en las tres componentes del espacio (Climent and Piedra 2012).

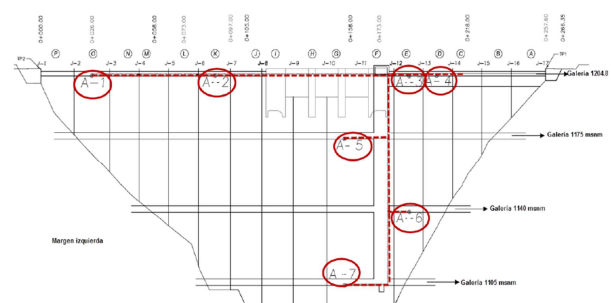


Figura 5: Ubicación de los sensores acelerométricos en la presa del C.P. Pirrís.

5. Análisis de la sismicidad

Se ha realizado un primer análisis de la sismicidad registrada por la red sísmica local en el entorno del embalse del C.P. de Pirrís diferenciándose entre los periodos de tiempo *antes*, *durante* y *después* de la fase de llenado, con el objetivo de diferenciar algún cambio en el comportamiento o patrón de sismicidad de la zona (Fig. 6). Con el fin de completar este estudio de sismicidad alrededor del embalse durante el periodo antes del llenado, y conocer cuál era la sismicidad de fondo en la zona, se cuenta con los datos registrados por la Red Sísmológica Nacional (RSN) desde el año 1977 hasta el momento de la instalación de la red sísmológica local. La mayor parte de los análisis realizados se han hecho con el paquete de herramientas de Mapseis.

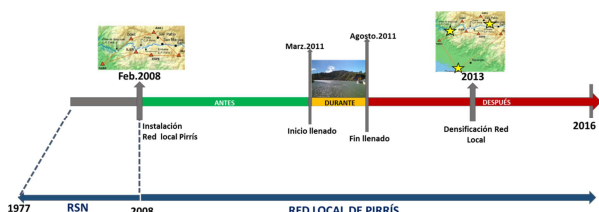


Figura 6: Línea del tiempo donde se muestra el momento de instalación de la red sísmológica local, la densificación de la misma red así como el periodo del llenado del embalse.

5.1. Análisis descriptivo

Para efectos del análisis propuesto, se han utilizado únicamente los eventos registrados por la red local de Pirrís descrita anteriormente, desde su instalación en Febrero de 2008, hasta finales del 2015. Este rango de tiempo cubre el periodo *antes* del llenado del embalse, así como el periodo *durante* y *después* del llenado. Los registros han sido homogeneizados a magnitud momento (M_w) a través de la relación propuesta por Rojas *et al.* 1993 (Ecs. 3 y 4).

$$M_S = -4.165 + 1.783 M_L \quad (3)$$

$$M_W = 2.251 + 0.655 M_S \quad (4)$$

Dónde:

- $M_L = M_C = M_d$.
- M_S : magnitud de las ondas superficiales.
- M_L : Magitud local o de Richter.
- M_C : magnitud de coda.
- M_d : magnitud duración.

Además de la diferenciación temporal en función de la fase de llenado, se han considerado diferentes áreas de estudio dependiendo del análisis realizado, que van desde los 5 km hasta los 20 km alrededor del centroide del embalse. Únicamente se han considerado los eventos superficiales (profundidades ≤ 20 km) y con un RMS en su localización menor de 0.4. Las características de cada uno de los catálogos utilizados en función del área de estudio escogida se recogen en la Tabla 4.

En la Figura 7 se muestran los histogramas que representan el número total de eventos en función de la magnitud, profundidad y horas del día, respectivamente,

para el área de 5 km alrededor del embalse. De esta forma se puede ver rápidamente cuales son las características predominantes del catálogo utilizado.

Tabla 4: Resumen de los datos del catálogo utilizado en función del área de influencia considerada

CATÁLOGO RED PIRRÍS	ÁREA de 20 km	ÁREA de 10 km	ÁREA de 5 km
Rango de Magnitudes	0.0 - 5.2	0.0 - 4.8	0.0 - 4.2
Rango de profundidades	≤ 20 km		
RMS	≤ 0.4		
nº total registros	2403	1354	561
periodo de tiempo	09/02/2008 19/12/2015	09/02/2008 16/12/2015	09/02/2008 16/12/2015

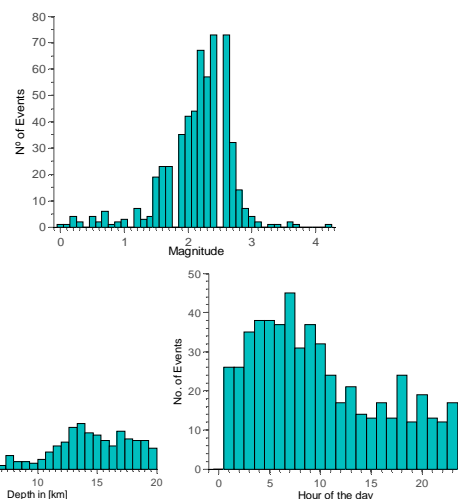


Figura 7: Histogramas de magnitud, profundidad y registro horario de eventos.

El mayor evento de la serie (M_w 4.2) dentro del área epicentral de 5 km, se registró en diciembre de 2011, casi 5 meses después del final del llenado del embalse a una distancia aproximada de 2 km del sitio de presa y profundidad de 2 km.

Analizando el número total de eventos, se comprueba que para las diferentes áreas de influencia escogidas, el número de eventos tras el llenado es muy superior a los registrados antes y durante el llenado. Sin embargo, dado que la ventana de tiempo que comprende cada periodo analizado es muy diferente, el número neto de eventos no es una variable del todo comparable (barras en Figura 8). Lo que sí se puede comparar, por estar normalizada, es la tasa de sismos diaria (línea negra) que muestra un claro ascenso progresivo tras el comienzo de las operaciones de llenado (Fig. 8).

Analizando el porcentaje de eventos registrados en función de diferentes rangos de magnitud, se comprueba que antes del llenado el mayor porcentaje de eventos registrados son de magnitudes ≤ 1.9 . Sin embargo, tras el llenado, los eventos que mayoritariamente se registran son de magnitudes ≥ 2.0 (Fig. 9).

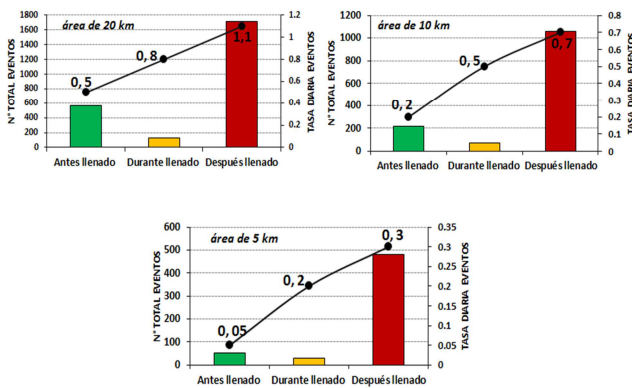


Figura 8: Número total de eventos (barras) y tasa diaria de sismos (línea negra) diferenciando entre antes, durante y después del llenado del embalse.

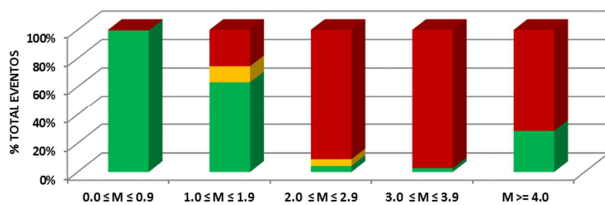


Figura 9: Porcentaje de eventos registrados para diferentes rangos de magnitud diferenciando el periodo de antes del llenado (verde), durante (amarillo) y después (rojo) del llenado.

Tras analizar más de 100 casos, Guha and Patil (1990) clasifican la sismicidad inducida en tres categorías en función de las magnitudes registradas: sismicidad intensa (magnitud superior a 6.0), moderada-débil (magnitud entre 3.1-5.9) y micro-temblores (magnitud inferior a 3.0). Siguiendo esta clasificación, el caso de la sismicidad asociada a Pirrís se encontraría dentro de la tercera categoría (micro-temblores) durante el llenado y de la segunda categoría (sismicidad moderada-débil) tras el llenado.

5.2. Análisis espacio-temporal

Si se analiza la distribución de sismicidad temporalmente, diferenciándose los tres periodos anteriores, *antes*, *durante* y *después* del llenado, se puede ver que, tras el inicio del llenado, la actividad sísmica en la zona empezó a aumentar, registrándose un nivel de sismicidad mayor alrededor del mismo. En la Figura 10, se muestra el número de eventos al mes junto con el número acumulado de sismos dentro de una distancia epicentral de 5, 10 y 20 km, respectivamente, diferenciándose los periodos *antes*, *durante* y *después* del llenado (colores verde, naranja y rojo respectivamente). En los tres gráficos se ve claramente el acusado aumento de la sismicidad tras el llenado del embalse, así como en el periodo de agosto de 2014, coincidiendo con un importante descenso del nivel de agua en el embalse.

En la zona más cercana al embalse (5 km), se detecta un aumento de pequeños eventos (Mw 1.5-3.0) espacialmente agrupados y muy superficiales (profundidades menores de 5 km). Esta sismicidad coincide justamente con las primeras operaciones

realizadas en el embalse, en las que puede apreciar un claro aumento de la pendiente del número acumulado de sismos. La magnitud máxima registrada en este primer *cluster* es de Mw 4.2 y corresponde con el máximo evento de la serie en el área de 5km alrededor del embalse (Fig. 10).

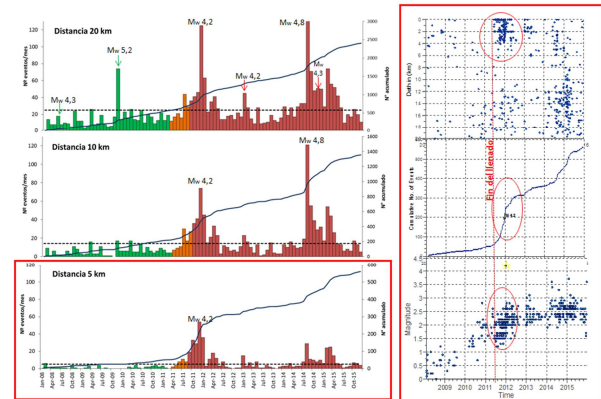


Figura 10: Evolución temporal de la serie sísmica considerando diferentes áreas (20, 10 y 5 km alrededor del embalse). Las barras representan el número de eventos al mes y la línea azul el número acumulado de sismos. Para el área de 5 km se muestra la distribución de epicentros en el tiempo en función de la profundidad, número acumulado y magnitud (figuras de la parte derecha).

Si se analiza la distribución espacial de los eventos más someros ($h \leq 5\text{km}$) en cada una de las fases estudiadas (Fig. 11), cabe destacar cómo, *antes* del llenado, los epicentros se encuentran más dispersos y conforme empiezan las operaciones de llenado, se puede apreciar un ligero aumento de la concentración de eventos en la zona más próxima al embalse, que se intensifica tras el llenado. *Después* del llenado, la concentración de sismos es mayor, aumentando también la magnitud, que llega a ser de Mw 4.2 para el mayor evento de la serie.

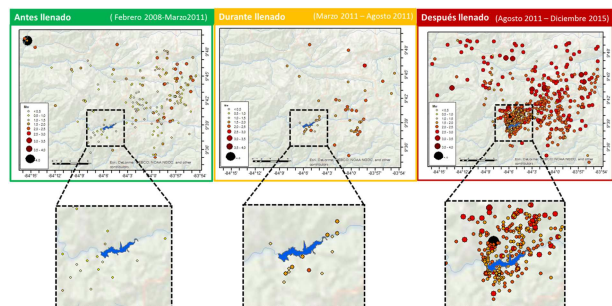


Figura 11: Distribución espacial de eventos antes, durante y después del llenado del embalse.

Con el objetivo de conocer la evolución espacio-temporal de la sismicidad, se ha elaborado el gráfico r-t (distancia epicentral-días) (Fig. 12). Como origen de distancias se ha elegido el centroide del embalse y el origen de tiempo se ha fijado en el momento en que se inició el llenado. Se puede ver que, justo al finalizar el llenado, los eventos se concentran a cortas distancias y conforme pasa el tiempo, los eventos empiezan a registrarse a distancias epicentrales ligeramente mayores (entre 6 y 12 km). Éste hecho, podría ser un indicativo de un cambio de fracturación en el medio, debido a una alteración de los esfuerzos en la zona, lo

cual podría venir explicado por una posible dispersión de la presión de poros por el medio.

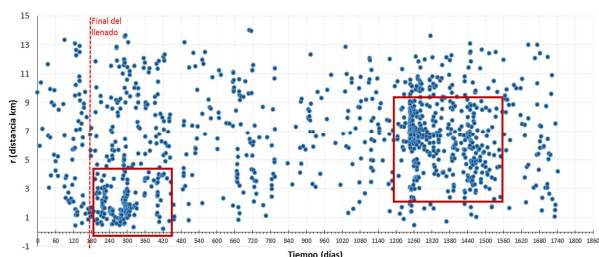


Figura 12: Gráfico r-t.

6. Análisis de parámetros sísmicos

6.1. Distribución frecuencia-magnitud. Ley de GR

Con el objetivo de caracterizar la sismicidad en la zona, se aplica la ley de Gutenberg-Richter (G-R) a la serie de datos y se analizan los parámetros resultantes del ajuste. Además se hace un análisis de la tendencia de la variación anual de los parámetros propios de la ley a través de una regresión lineal.

La relación de G-R ($\log N = a - bM$) representa la relación entre el número de sismos y su magnitud (Gutenberg and Richter 1944). N representa el número de terremotos de magnitud igual o mayor que m , y a es el número de terremotos de magnitud $M=0$. La variable b describe la relación entre terremotos pequeños y grandes y expresa la pendiente del mejor ajuste entre el número de terremotos a una magnitud dada y la magnitud. En el caso de la sismicidad natural, el valor de b suele estar comprendido entre 0.8-1.0 y varía entre los diferentes tipos de regiones. Sin embargo, se ha observado que, para diferentes situaciones de sismicidad inducida, el parámetro b suele tener un valor mayor y más cercano a 2.0 (Gupta *et al.* 1972 a, b).

En este caso, se ha llevado a cabo un análisis de los parámetros de la recta de G-R con los datos de la Red Sismológica de Pirrís, tomando el área de 20, 10 y 5 km alrededor del embalse. Para ello se ha utilizado el programa Mapeis que realiza el ajuste por máxima verosimilitud y se han aplicado dos métodos diferentes para la estimación de M_c : el método EMR y el de máxima curvatura (Fig. 13).

	MÉTODO 1 (Máx. curvatura)				MÉTODO 2 (EMR)			
	b	a	$a(\text{anual})$	M_c	b	a	$a(\text{anual})$	M_c
20 km	1.72±0.36	7.28	6.39	2.5±0.05	2.21±0.15	8.66	7.76	2.6±0.07
10 km	1.72 ± 0.27	6.96	6.06	2.4±0.06	2.5 ± 0.17	9.13	8.23	2.6±0.06
5 km	2.05 ± 0.56	7.38	6.49	2.5±0.14	2.53±0.3	8.70	7.81	2.6±0.01

Figura 13: Parámetros de GR para diferentes zonas de influencia con dos metodologías diferentes.

Por otro lado, tomando exclusivamente el área de 20 km, se han diferenciado las tres etapas de *antes*, *durante* y *después* del llenado obteniéndose en cada una los parámetros de la recta de GR resumidos en la Figura 14. En este caso se ve claramente el cambio en el valor de b antes y tras el inicio del llenado, pasando de un valor más próximo a la unidad (caso de sismicidad natural) a un valor mayor y próximo a 2 (tal y como se han observado en otros casos de sismicidad inducida).

Asimismo se refleja un importante ascenso de la tasa anual de sismos (a (*anual*)) variando de aproximadamente 3 eventos al año antes del llenado a 8 tras el inicio del llenado. Aplicando ambos métodos se comprueba que los resultados convergen dando una mayor robustez a las estimaciones obtenidas.

AREA 20 km	MÉTODO 1 (Máx. curvatura)				MÉTODO 2 (EMR)			
	b	a	$a(\text{anual})$	M_c	b	a	$a(\text{anual})$	M_c
Antes	0.66 ± 0.06	3.17	2.68	0.81 ± 0.15	0.73 ± 0.11	3.29	2.81	1.0 ± 0.25
Durante	2.56 ± 0.96	7.44	7.79	2.2 ± 0.18	2.86 ± 0.93	8.14	8.5	2.3 ± 0.13
Después	1.99 ± 0.39	8.04	7.4	2.5 ± 0.1	2.27 ± 0.1	8.82	8.18	2.6 ± 0.06

Figura 14: Parámetros de GR para los periodos temporales de antes, durante y después del llenado.

Además se ha realizado el análisis de la ley de GR de la serie antes del llenado, utilizando únicamente los datos registrados por la RSN para ver la tasa de fondo de la sismicidad natural en la zona y por otro lado, a partir del inicio del llenado, considerando los datos de la Red local de Pirrís. Se comprueba que el valor de b regional antes del llenado es menor que el valor de b tras el inicio del llenado del embalse (Fig. 15).

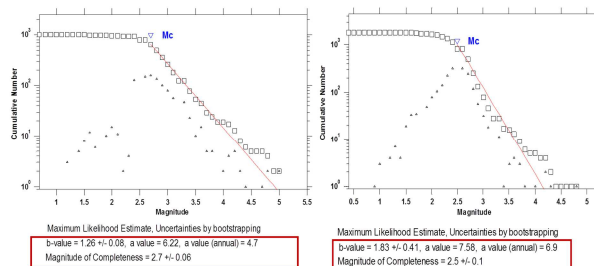


Figura 15: Rectas de GR teniendo en cuenta el catálogo de la RSN hasta el comienzo del llenado (gráfico izquierdo) y utilizando los datos registrados por la Red Sismológica Local de Pirrís tras el inicio del llenado (gráfico derecho).

Por otro lado, se ha intentado analizar la tendencia anual de los parámetros b , magnitud máxima teórica y magnitud mínima (M_c), a través de regresión lineal por mínimos cuadrados para estimar el valor de la pendiente (Fig. 16). La tendencia general de los parámetros estudiados es creciente en el tiempo. En cuanto al parámetro b , la tendencia ascendente del valor estimado es progresiva en el tiempo, tomando valores más próximos a 2 a partir de 2011 cuando se produce el llenado. Sin embargo, en 2014 el valor estimado es menor, debido a que el ajuste de la recta de GR tiende a ser bilineal, por lo que el valor mostrado en la gráfica no es un valor propio de un buen ajuste de los registros de ese año.

6.2. Variación temporal del parámetro b

El análisis de la evolución temporal de parámetros sísmicos se realiza a través del método de ventanas deslizantes, a partir del cual se calculan los parámetros para diferentes ventanas temporales cuyo tamaño se fija con el número de eventos. Las ventanas se van desplazando en el tiempo con un solape fijo. Haciendo diferentes pruebas se llega a encontrar la ventana óptima para el análisis temporal de cada parámetro. En este caso, la ventana mínima utilizada para la estimación de b es de 120 eventos con un solape entre ventanas del 10 %, obteniéndose un error en la

estimación del parámetro b menor a 0.5 (Fig. 16). El valor de b se mantiene en la franja de 1.5 - 2.5 hasta aproximadamente mediados de 2014, cuya tendencia cambia, empezando a tomar valores superiores (Fig. 17). Este momento de cambio en la estimación de b coincide precisamente con un hecho observado en el análisis espacio-temporal de la sismicidad (gráfico $r-t$ de Figura 11) en donde los eventos empiezan concentrarse a mayores distancias respecto del embalse. Esto podría ser otro indicador que esté informando de una posible dispersión de la presión de poros por el medio, hecho que debe ser analizado con mayor detalle para su confirmación.

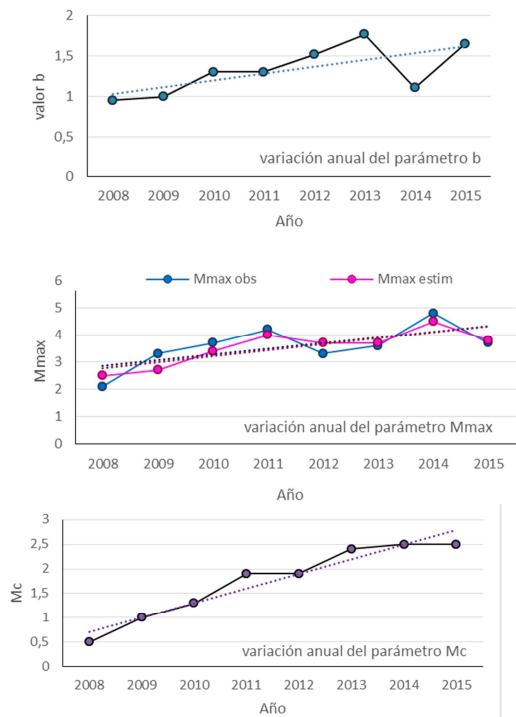


Figura 16: Análisis anual de diferentes parámetros (valor de b , M_{max} y M_c).

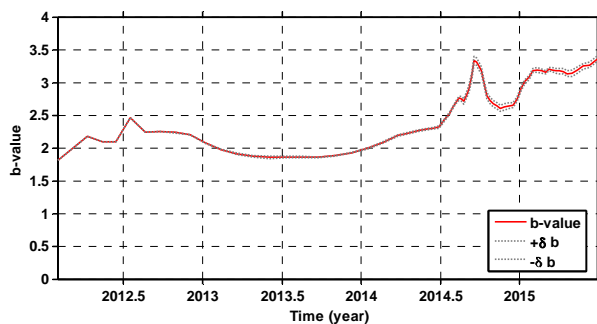


Figura 17: Evolución temporal de b .

6.3. Relación de la sismicidad con los cambios en el nivel de agua en el embalse

Diferentes autores (Gupta 1983, Gupta *et al.* 2002) han puesto de manifiesto que para el análisis de la sismicidad asociada a embalses hay que tener en cuenta factores como la velocidad de variación del nivel del agua, el tiempo de duración del proceso de carga, el nivel máximo alcanzado y el periodo de tiempo durante

el cual se mantiene este nivel máximo, pues son factores que están estrechamente relacionados con la posible actividad sísmica en la zona. En nuestro caso de estudio y viendo la gráfica de los cambios de nivel en el embalse, se aprecia que el nivel máximo del mismo se suele mantener entre 5 a 6 meses, coincidiendo normalmente con los meses de julio y agosto. Los cambios más acusados en el nivel de agua se producen en un tiempo de 2 a cuatro meses, y las variaciones nunca superan los 15 m de diferencia en el nivel del embalse al día y de 22 m/mes tras el primer llenado.

Se puede apreciar que hay una clara correlación entre el aumento de la sismicidad y el primer llenado del embalse (Fig. 18). Sin embargo, lo que no se ve tan claro es que exista una correlación entre la sismicidad y los sucesivos cambios en el nivel del embalse. Por ello sería importante cuantificar esta posible correlación

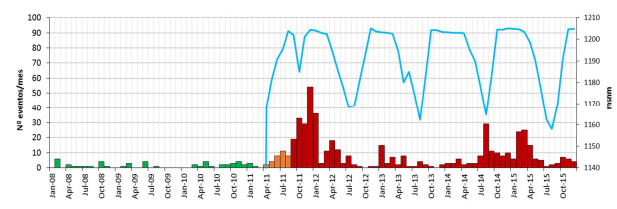


Figura 18: Nivel del embalse al mes (línea azul) junto con la sismicidad registrada al mes (columnas).

7. Estimación de la magnitud máxima

La cuestión de la magnitud máxima que puede ser atribuida a casos de sismicidad asociada a grandes embalses es difícil de clarificar. Una opción es fijarse en otros casos y ver que magnitudes máximas se han alcanzado en ellos. En el caso de sismicidad natural, en general una magnitud de 9-9.30 es aceptada como máxima observada. Considerando todos los casos hasta ahora conocidos de sismicidad disparada por embalses, solo en cuatro ocasiones se han alcanzado magnitudes de 6.0 - 6.3. Se podrían aceptar tales valores de magnitud como el umbral de la M_{max} esperada en estos casos (ICOLD)

Con base en los sismos históricos e instrumentales, el sismo máximo probable para el proceso de subducción es un evento de magnitud 7.0. Las intensidades máximas probables para la zona son del orden de I VIII (EMS). Con esta intensidad se esperaría una sacudida del suelo lo suficientemente fuerte como para originar deslizamientos superficiales en zonas inestables y con fuerte pendiente.

Para el caso estudiado se han probado las metodologías propuestas por Kijko (2004; 2011).

Se ha realizado la estimación de la magnitud máxima teniendo en cuenta toda la serie sísmica, así como los periodos de *antes*, *durante* y *después* del llenado, considerados de forma independiente. Los resultados obtenidos con cada uno de los métodos aplicados, así como el valor promedio de todas las estimaciones, son presentados en la Tabla 5 resaltando la magnitud máxima observada en cada caso.

Se puede comprobar que el promedio de las máximas estimadas es mayor a la magnitud máxima estimada en todos los casos, siendo esta diferencia mayor para el caso del periodo de antes del llenado.

Tabla 5: Magnitudes máximas estimadas junto con un promedio de todas las estimaciones y la magnitud máxima observada. Análisis realizado para toda la serie así como para el periodo de antes, durante y después del llenado independientemente.

	$M_{max} \pm \sigma$			
	<i>Todo</i>	<i>Antes</i>	<i>Durante</i>	<i>Después</i>
Mmax Observada	5.2	5.2	2.9	4.8
N-P-G	5.5 ± 0.3	5.9 ± 0.7	3.0 ± 0.1	5.1 ± 0.3
Order Statistics CDF	5.4 ± 0.3	5.6 ± 0.5	3.0 ± 0.2	5.0 ± 0.2
Based on 5 largest mag	5.4 ± 0.3	5.7 ± 0.5	3.0 ± 0.1	5.0 ± 0.2
Kijko-Sellevoll	5.9 ± 0.7	5.9 ± 0.7	3.1 ± 0.2	5.4 ± 0.6
Tate-Pisarenko-Bayes	6.0 ± 0.8	5.9 ± 0.7	3.1 ± 0.3	5.5 ± 0.7
Kijko-Sellevoll-Bayes	5.6 ± 0.4	5.6 ± 0.4	3.0 ± 0.2	5.1 ± 0.3
Robson-Whitlock	5.6 ± 0.5	6.1 ± 0.9	3.1 ± 0.3	5.3 ± 0.5
Robson-Whitlock-Cooke	5.4 ± 0.2	5.6 ± 0.5	3.0 ± 0.2	5.0 ± 0.3
Mmax Estimada (Promedio)	5.6	5.8	3.0	5.2

8. Líneas futuras y próximos pasos a realizar.

Tras este primer análisis realizado de la serie sísmica entorno al embalse de Pirrís, las próximas tareas a realizar están dirigidas a trabajar en los aspectos más físicos ligados a la ocurrencia de sismos asociados al llenado de embalses, ahondando en el estudio de los cambios de esfuerzos en la zona que puedan influir en la ocurrencia de nuevos sismos. Con la serie sísmica actualizada y relocalizada hasta finales de 2016 se calcularán, en primer lugar, los cambios de esfuerzos estáticos de Coulomb debido al peso vertical de la columna de agua en el embalse. Posteriormente se analizarán posibles cambios de esfuerzos poro elásticos debidos a infiltraciones de agua, estudiando el proceso de difusión de presión de poros por el medio. Todo esto permitirá definir una función de densidad de magnitudes que será un input de entrada fundamental para la metodología que se desea desarrollar, dirigida a la estimación de la peligrosidad sísmica incluyendo sismicidad inducida o sismicidad disparada. Además se quiere probar si la función de magnitudes que finalmente se obtenga se ajusta a otros casos de llenado de embalses y si podrá ser utilizada para

predecir de cierta manera la sismicidad inducida y/o disparada a corto-medio plazo en otras obras hidroeléctricas, como es el caso del C.P. de Reventazón (Costa Rica).

9. Conclusiones

El análisis hasta ahora realizado, ha permitido encontrar diferentes indicadores que permiten confirmar la existencia de sismicidad asociada al llenado del embalse. Lo que no es tan claro es la correlación con los cambios en el nivel del embalse en los sucesivos años y la sismicidad. Algunos de estos indicadores son:

- Aumento de la sismicidad en los alrededores del embalse tras el inicio de la operación de llenado, lo que se refleja en la tasa diaria de sismos en las áreas analizadas alrededor del mismo (5 y 20 km)
- Se comprueba como la sismicidad cambia espacialmente *antes y después* del llenado, aumentándose la concentración de sismos en las proximidades del Norte del embalse.
- El valor del parámetro b es próximo a 2.0 tras la operación de llenado.
- Los cambios temporales del valor de b podrían estar indicando la presencia de un fenómeno de difusión de la presión de poros.
- Siguiendo la clasificación de sismicidad disparada en función de la magnitud, propuesta por Guha and Patil (1990), en el CP de Pirrís estaríamos ante un caso de microsismicidad disparada durante el llenado y de una sismicidad moderada-débil tras el llenado.
- Aplicando diferentes técnicas (Kijko 2004) las estimaciones de magnitud máxima M_{max} llegan a valores de 5,8, que son mayores que la M_{max} observada de 5,2.
- Aunque existen fallas locales cerca del embalse, que por sus condiciones podrían ser reactivadas, son fallas pequeñas con un potencial para generar sismos de magnitudes moderadas (M_{max} 5,8). Sin embargo, en los alrededores existen fallas de mayor tamaño.

Agradecimientos

Agradecimiento especial al Instituto Costarricense de Electricidad, por facilitarnos el acceso a toda su información para la realización de este estudio.

References

- BARQUERO, R. and ALVARADO, G., 2012. Actividad sísmica 2008-2009 en los alrededores del Centro de Producción de Pirrís, Informe Interno ICE.
- BARQUERO, R. and CLIMENT, A., 2006. Estudio sísmológico y tectónico para la cuenca del río Pirrís, Informe Interno ICE.
- BARQUERO, R., LÓPEZ, A. and BARRANTES, J., 2001. Proyecto hidroeléctrico Pirrís: Estudio del potencial de sismicidad inducida. Inf. Interno ICE. 71 pp.

- BOURNE, S.J., OATES, S.J., BOMMER, J.J., DOST, B., VAN ELK, J. and DOORNHOF, D. 2015. A Monte Carlo Method for Probabilistic Hazard Assessment of Induced Seismicity due to Conventional Natural Gas Production. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 105, pp. 1721-1738.
- CLIMENT, A. and PIEDRA, R. 2012. Instrumentación acelerográfica presa C.P. Pirrís. Análisis de los registros acelerométricos obtenidos en la presa Pirrís ante eventos sísmicos ocurridos en el 2011 y 2012. Informe interno Instituto Costarricense de Electricidad.
- CONVERTITO V., MAERCKLIN N., SHARMA N., and ZOLLO A., 2012. From Induced Seismicity to Direct Time-Dependent Seismic Hazard. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 102, no. 6, pp. 2563-2573.
- DENYER, P., MONTERO, W. and ALVARADO, G.E., 2003. Atlas tectónico de Costa Rica. 81 pp. Edit. Univ. de Costa Rica, San José.
- Embalses de Plantas Hidroeléctricas ICE, Informe interno área de Ingeniería Hidráulica (ICE), agosto 2012.
- GUHA, S.K and PATIL, D.N., 1990. Large water reservoir related induced seismicity, *Gerlands Beitr. Geophysik*, 99, pp. 3-5.
- GUPTA, H.K. 1983. Induced seismicity hazard mitigation through water level manipulation at Koyna, India: A suggestion, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 73, pp. 679-682.
- GUPTA, H.K., 2002. A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India. *Earth-Science Reviews* 58, pp. 279-310.
- GUPTA, H.K., MANDAL, B.K. and RASTOGI, 2002. How long will triggered earthquakes at Koyna, India, continue?, *Current Science*, 2, pp. 202-210.
- GUPTA, H.K., RASTOGI, B.K. and NARAIN, H., 1972a. Common features of the reservoir associated seismic activities. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 62, pp. 481– 492.
- GUPTA, H.K., RASTOGI, B.K. and NARAIN, H., 1972b. Some discriminatory characteristics of earthquakes near the Kariba, Kremasta and Koyna artificial lakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 62, pp. 493– 507.
- GUTENBERG, B. and RICHTER, C.F., 1944. Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 34, pp. 185-188.
- ICE, 2011. Informe geológico viviendas dañadas barrio las Rojas-Zapotal (2011), ICE.
- ICE, 2006. Informe Interno ICE. Red sísmológica para el P.H. Pirris.
- ICOLD, *International Commission On Large Dams*, 2004. Committee on Seismic Aspects of Dam Design. Reservoir and seismicity. State of Knowledge.
- KEBEASY, R. M., MAAMOUN, M., IBRAHIM, E., MEGAHED, A., SIMPSON, D. W. and LEITH, W. S., 1997. Earthquake studies at Aswan reservoir, *J. Geodynam.*, 7, 173–193.
- KIJKO, A., 2004. Estimation of the maximum earthquake magnitude, *Pure and Applied Geophysics* 161(8), pp. 1655-1681.
- KIJKO, A. and SINGH, M., 2011. Statistical Tools for Maximum Possible Earthquake Magnitude Estimation. *Acta Geophysica*, 59, 4, pp. 674-700. DOI:10.2478/s11600-011-0012-6.
- MCGARR, A. and SIMPSON, D., 1997. In "Rockbursts and Seismicity in Mines", pp. 385-396, Balkema.
- MONTERO, W. y CLIMENT, A. 1990. Los terremotos de Grecia de 1882 y de Quepos de 1952, Costa Rica, distribución de intensidades y origen tectónico. *Ciencia y Tecnología*, 14(1-2), pp. 81-105. San José, Costa Rica.
- MORA, S., VALVERDE, R. and BRENES, G., 1985. Análisis Geológico-Geomorfológico de la Cuenca del río Pirrís (Parrita) Costa Rica. Estudio del Dpto Ingeniería Forestal ITCR, Cartago Costa Rica.
- PETERSEN, M.D., MUELLER, C.S., MOSCHETTI, M.P., HOOVER, S.M., SHUMWAY, A.M., MCNAMARA, D.E., and RUBINSTEIN, J.L., 2017. 2017 one-year seismic-hazard forecast for the Central and Eastern United States from induced and natural earthquakes. *Seismological Research Letters*, 88(3), pp. 772-783.
- RED SISMOLÓGICA NACIONAL (RSN: ICE-UCR): Banco de datos sísmológicos de Costa Rica.
- ROJAS, W., 1993. Catálogo de sismicidad histórica y reciente en América Central: Desarrollo y análisis. Tesis de Licenciatura. Norwegian Seismic Array (NORSAR), Noruega.
- SIMPSON, D.W., LEITH, W.S. and SCHOLZ, C.H., 1988. Two types of reservoir-induced seismicity. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78(6), pp. 2025-2040.
- TALWANI, P., 1987. On nature of reservoir-induced seismicity. *Pure Appl. Geophys.* 150, pp. 473–492.
- WELLS, D.L., and COPPERSMITH, K. J., 1994. New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area and Surface Displacement. *Bulletin Seismological Society of America*, Vol. 84, No. 4.

STRESS TRANSFERRE AND STATISTICAL ANALYSIS OF 2012 AHAR-VARZEGHAN SEISMIC SEQUENCE, NORTHWESTERN IRAN

TRANSFERENCIA DE ESFUERZOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA SERIE SÍSMICA DE AHAR-VARZEGHAN (NOROESTE DE IRÁN) DE 2012

Pouye Yazdi^{a,*}, Jorge M. Gaspar Escribano^a, Miguel Angel Santoyo^b

^a ETSI Topografía Geodesia y Cartografía, UPM, Campus Sur, 28031 Madrid, Spain. p.yazdi@alumnos.upm.es; jorge.gaspar@upm.es

^b Institute of Geophysics, UNAM, Campus Morelia, 58190 Morelia, Mexico. santoyo@geofisica.unam.mx

Abstract:

In 11 of August 2012, two destructive earthquakes with $M_w=6.4$ and 6.2 occurred between cities Ahar and Varzeghan (Northwest Iran). They had a close epicentral distance of 6 Km and also had a short time lag of 11 minutes. Following that, a high-rate of aftershock activity began where during the first month more than 2000 events ($M \geq 0.7$) affected several villages in the area. The seismic released energy induced significant damage and losses in an extensive zone. Right after the seismic doublet occurrence, a surface rupture with a primarily east-west orientation was observed. The idea of having an almost vertically dipped fault plane for the first shock is more consistent with the trace of the upper edge on the surface and the focal mechanism solutions which propose a steady dipping EW. Previous studies propose different geometries for the generating faults of the second earthquake. In this study, we associate the surface rupture with the first mainshock and both nodal plane explaining the relationship between the two main seismic events are discussed after Coulomb failure stress calculation due to the first shock. Then the stress transfer because of the doublet is analyzed in order to determine its consistency with the statistical modeling prediction for the aftershock population and spatial distribution. For statistical modeling a temporal version of Epidemic Type Aftershock Sequence (ETAS) is applied on one-year seismicity including events with minimum magnitude of 2.5.

Key words: Statistical Seismology, ETAS, Coulomb Failure stress, IRAN

Resumen:

Dos terremotos destructivos, de magnitudes $M_w=6.4$ y 6.2 , ocurrieron el 11 de agosto de 2012 entre las ciudades iraníes de Ahar y Varzeghan. Los epicentros se situaron cerca entre sí, a una distancia de 6 km, y con un intervalo temporal de 11 minutos. La serie de réplicas subsiguiente se desarrolló con una tasa alta, de más de 2000 eventos en el primer mes ($M \geq 0.7$). El movimiento sísmico produjo considerable daño y pérdidas en una zona extensa. El primer evento causó una ruptura semi-vertical, consistente con uno de los planos nodales del mecanismo focal y con una ruptura en superficie con orientación este-oeste. En cuanto a la falla causante del segundo evento principal, existen varias hipótesis. En este trabajo se realiza un modelo de transferencia de esfuerzos estáticos de Coulomb debidos al primer evento para delimitar las zonas cargadas de esfuerzos en las que es más plausible que se haya desencadenado el segundo evento principal. Seguidamente, se considera el cambio de esfuerzos producido por los dos eventos a fin de determinar cuales son las zonas cargadas positiva y negativamente de esfuerzos. De forma complementaria, se desarrolla un modelado estadístico de la población de réplicas y su distribución espacial. Se usa la versión temporal del modelo ETAS (Epidemic Type Aftershock Sequence) para identificar los eventos que son réplicas y se analiza su distribución espacial en relación a la distribución de los incrementos / decrementos de esfuerzos de Coulomb.

Palabras clave: Sismología estadística, ETAS, Transferencia de esfuerzos de Coulomb, Irán

1. Introduction

The northwestern Iran (Fig. 1a) is historically associated with destructive earthquakes mainly related to North Tabriz fault (NTF) which is the largest active fault in this area created due to the collision of the Arabia-Eurasia plateau. This fault stands at about 50 km to the southeast of Ahar and Varzeghan cities expanding along 150+ km in NW-SE direction. NTF in most parts has a nearly vertical dip and right lateral strike-slip character (Berberian and Arshadi 1976). During past two decades since the Iranian seismic network is covering this area, there has been no important seismic activity rather than

dispersed seismicity on the northern region of NTF. GPS vectors at the NTF indicates a mainly north-northeast tectonic movement. Close to Ahar, the average slip (between 1999 and 2009) along the segment is of about 11 mm/year (Djamour *et al.* 2011). Right after the doublet a surface rupture was occurred in the area (Fig. 1b). It was mapped along 8 km by mean of an optical satellite images cross- correlation analysis (Copley *et al.* 2014). Field studies also revealed a longer ruptured distance up to 13.

* Corresponding Author: Pouye Yazdi, p.yazdi@alumnos.upm.es

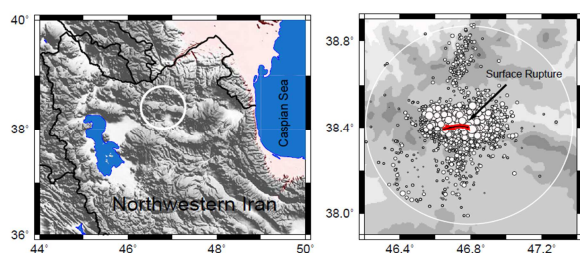


Figure 1: Location of the Ahar-varzeghan seismic sequence inside the northwestern Iran (right). The epicentral distribution of over 5000 events during 26 months since 1st Jun 2012.

The east-west right-lateral strike slip solutions for both events' focal mechanism may lead to associate the rupture with the first, second or both shocks. At the same time, doublets with similar focal mechanisms are less expected to happen so close in both time and space (less than 10 km and 1 hour) and even less likely in an intraplate zone. In this work the spatio-temporal statistical characterization of the 2012 Ahar-Varzeghan seismic sequence is investigated. After this, we then analyze the static stress transfer because of the 2012 AV-doublet and study its correlation with spatial distribution of re-located series.

2. Data Analysis

Identifying the changes in the seismic behavior after the occurrence of the doublet where the seismic activity rate increases reaching up to 250 events per day needs a selection of data where they are homogeneously registered in terms of time and magnitude. Here in order to select such catalogue we study the evolution of seismic rate and magnitude frequency since the AV-doublet occurrence.

Figure 2 shows that about three months later after the beginning of the series, a new jump in the activity rate (128 events per day) takes place following the largest aftershock with $M_w=5.6$ on 7th Nov 2012. In Figure 2, it is shown that it takes about one year for the seismic rate to cool down into a more stable state. Indeed, a one-year time period might contain the essential information of seismic activity. This period starting from 1st Aug 2012 to the end of Jul 2013, includes 4558 events ($M \geq 0.7$) inside the circle in Figure 1 ($R=50$ km) around the epicentral location of the AV-doublet.

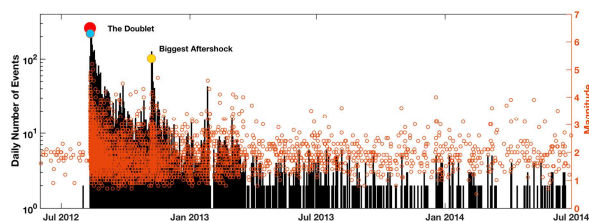


Figure 2: Temporal variation of daily rate of seismicity during 26 months and magnitude distribution of the IRSC online catalog with more than 5000 events with $M \geq 0.7$.

To assure an adequate analysis of the series we performed a completeness analysis of the catalog. The best minimum or cut-off magnitude $M_c=1.9$ is calculated using Wiemer and Wyss (2000) method and applying magnitude frequency law of Gutenberg and Richter (1956). Earthquake magnitudes are assumed to follow

the Gutenberg-Richter law (GR) which describes the number of earthquakes with magnitude equal or greater than M as in Eq. (1):

$$N(M) = 10^{a-bM} \quad (1)$$

The b -value generally scatters around 1 but for rocks, however under high stress it might have a lower value (Scholz 2015; Schorlemmer *et al.* 2005). A $b=0.75$ is calculated for the whole catalog using the maximum likelihood estimation and $M_c=1.9$. However, the IRSC online database only gives the epicenter error of events with $M \geq 2.5$. Thus, even though the obtained completeness magnitude is less than 2.5, the final selected catalog in this study will be 826 events with $M \geq 2.5$ occurred during one year inside an epicentral area of about 2500 Km^2 and we named it AV1213.

3. Re-localization

Enhancing the original hypocenter of the earthquake is essential for further verifications of static stress changes due to the AV-doublet. Thus, AV1213 with 826 events was re-located using Double Difference re-localization method (Waldhauser and Ellsworth 2000). The initial condition for generating the event-pairs modifies the precision of the process and the percentage of re-located events gets smaller under strongly confined coupling condition. A minimum requirement of having 8 double-difference equations for pairing earthquakes leads to 405 remaining events. The velocity model of Rezaeifar *et al.* (2016) for northwestern Iran with a mean V_p/V_s of order 1.76 is applied. Figure 3 shows how the 376 re-located events are concentrated in two main depth ranges; 4-9 and 15-22 km.

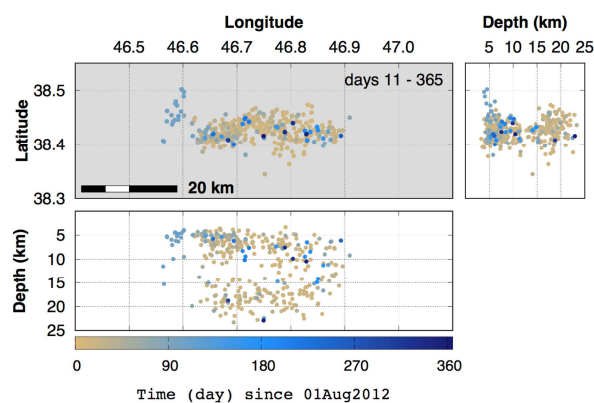


Figure 3: Result of hypoDD for over 300 relocated events projected to horizontal and vertical planes.

4. ETAS Modeling

The AV1213 sequence starts with two relatively big shocks. The upcoming earthquake population on one side consists of events triggered by earthquake-earthquake stress transfer. On the other side we also have events which might not be exclusively attributed to this internal stress loading. Instead, they are associated with external processes tend to change the state of seismic activity during upcoming months. The causing aseismic process in the case of northwestern Iran might be tectonic plate motions and stress buildup at north of Tabriz fault. A point process model with a conditional intensity function would characterize the seismic

population in a way that at any time t , any previous earthquakes might be considered as a potential mainshock. In this section we use Epidemic Type Aftershock Sequence (ETAS) model (Ogata 1988) applying the algorithm developed by Marsan et al. (2013). Time variation of the background seismicity rate will be:

$$\lambda(t) = \mu(t) + \nu(t) = \mu(t) + \sum_{t_i < t} \frac{K_0 e^{\alpha(M_i - M_c)}}{(t - t_i + c)^p} \quad (2)$$

Where t_i and M_i are the occurrence times and magnitudes of earthquakes. This formulation separates the time-dependent forcing (background) rate $\mu(t)$ and the earthquake rate $\nu(t)$ related to earthquake–earthquake triggering, where parameters c and p come from the Omori law (Utsu *et al.* 1995) and K_0 and α are related to the magnitude-dependent aftershock productivity. The applied algorithm iteratively estimates the four parameters K_0 , α , c , and p of the ETAS model by maximizing the log-likelihood value inside a time interval and then estimating the time-dependent background rate using the $\pm n$ -nearest neighbors. Figure 4 illustrate the temporal changes in the background seismicity rate for five obtained ETAS parameters in Table 1. From the descending shape of the decay it is evident that apart from the jump in the rate after the earthquake on November 7th, the background activity in late 2012 and early 2013 experience a smooth growth and finally decreases to ~ 0.05 (per day) or one event with $M > 2.5$ per 100 days.

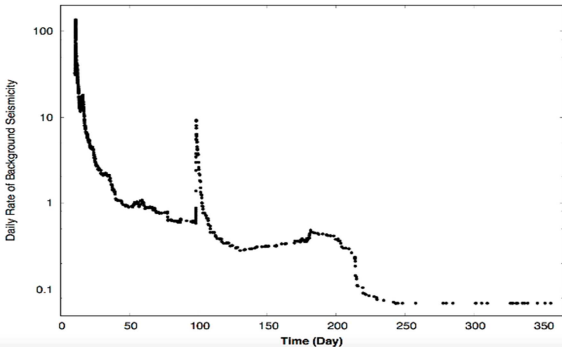


Figure 4: Time varying background seismicity rate obtained by ETAS modelling.

Table 1: The ETAS parameter for which the Akaike. Information Criterion (AIC) yields $n=21$ as optimal smoothing window

ETAS parameters	K_0	c	p	α	N_{BG}/N
MLE results for $n=\pm 21$	0.013	0.021	1.095	1.614	0.44

Figure 5 illustrate how ETAS is highly capable of modeling this seismic sequence where the cumulative number of events after modelling remains close to the observed number.

5. Assessing the source model for the doublet

First Shock: Concluding from the active faulting map that Ghods *et al.* (2015) provide together with the rupture alignments the faulting strike is divided into five vertical

segments (Fig. 6). Such segmentation along almost 19 km might overestimate the change in the strike however it does not complicate the model but just build a more detailed geometry. For continental tectonic setting and a strike slip fault, the selected fault with 19.08 km surface rupture is empirically relevant with $M_w=6.41$ (Stirling *et al.* 2013)

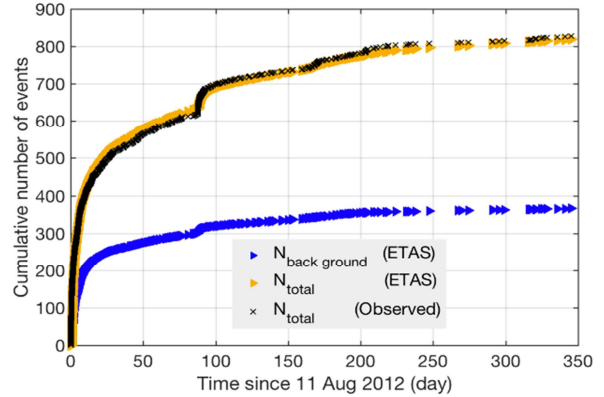


Figure 5: The cumulative number of events before and after ETAS modelling.

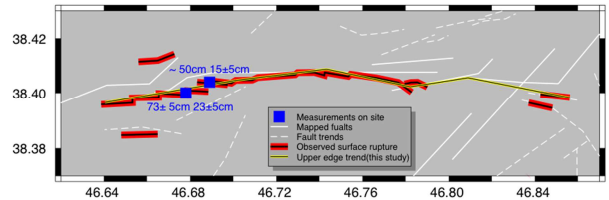


Figure 6: The ruptured area and location of mesurement. Yellow line indicates the strike of five segments we considered in this study. The red line shows the surface rupture trend.

In the previous studies and calculation by national and international agencies distinct depth for the first shock is determined. Donner *et al.* (2015) assume that the start of rupture is located at 14 km (Ghods *et al.* 2015) and the centroid they estimate using waveform inversion is located at shallower depth (6 ± 1) km. Adopting their estimations, the constructed fault plane in this study have 14 km width and all main five segments start from surface and slop down 14 km (dip =90) as shown in Figures 7.

For weighting the net-slip we introduce a cushion shape model which implies assignation of the maximum weight for net-slip to the central area of the fault. The weighting function W , we use to make this cushion model, is the probability density function of a circle-arc with angle of θ ($\theta \leq 180^\circ$). This function basically gives a simple curve for constructing weights along both length $W(l)$, and wide $W(w)$ of the fault. We did modifications on the circle-arc angle and offset of its center from depth of 7 km in order to simulate the measurements on the surface rupture. The resultant weighs for net-slip along depth $W(w)$ is shown in Figure 8 as gray belts for each vertical segments. In this figure, $W(l)$ is also shown for the net-slip along fault's strike; which is flattened in the middle section regarding to lake of evidence for centralized slip along specific longitude.

Considering the measured oblique slip at the west part, a gradual change in rake (increments of 5°) is assumed;

λ changes from 180° in eastern segment to 160° in western one. Finally, multiplying all weights by a constant value we simulate the measured displacements at the surface with maximum strike-slip of 73 cm and complete the construction of our source model (Fig. 9).

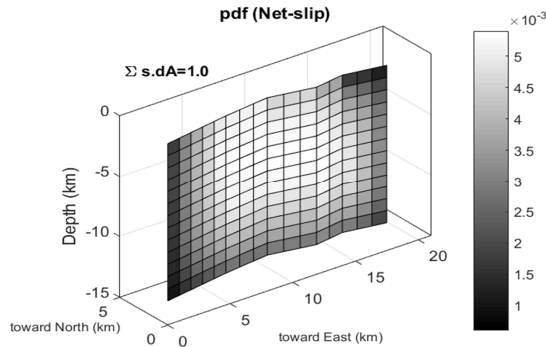


Figure 7: The designed vertical fault plane and pdf of netslip on it for source model of the first shock.

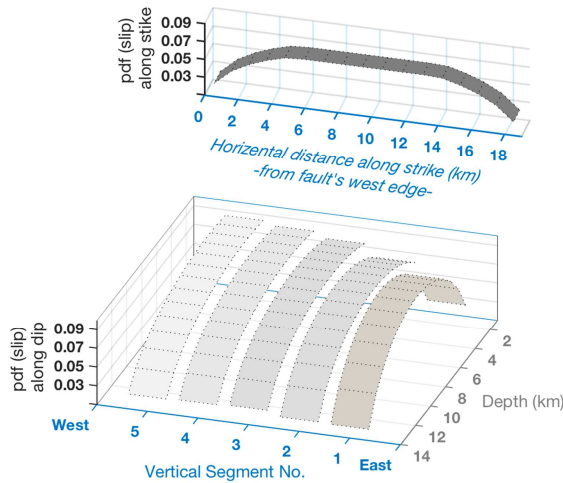


Figure 8: The slip distribution along width and strike of the plane in figure 7.

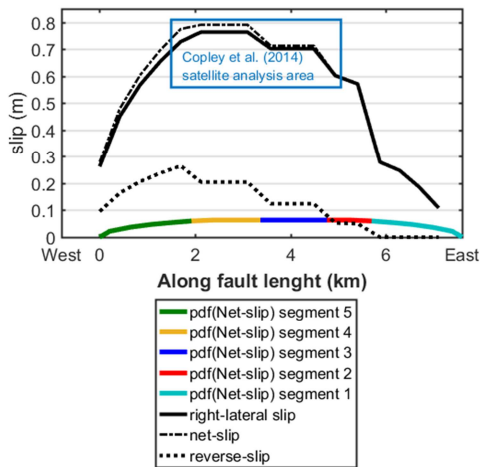


Figure 9: The achieved net-slip model for the first shock fault.

The empirical formula by Stirling *et al.* (2013) for stable continental tectonic regime results $M_w=6.41$ for total

seismic moment $M_0 = \sum \mu_s \cdot dA \cdot dS = 4.73 \times 10^{25}$ Dyne.cm (Aki 1966) and shear modulus $\mu_s = 32$ GPa.

Second mainshock; In contrary to the first mainshock, there is no common agreement about the orientation of the ruptured plane for the second mainshock. Previous studies argue both nodal planes. Donner *et al.* (2015) argue that the earthquake waveform data together with the rock mechanism suggest that the slip on east-west plane is less probable and the north-south plane with eastward dipping is more presumable as the causative fault for the second mainshock. Nevertheless, one possibility is that the second mainshock is an elastic rebound which responds to the abrupt change of Coulomb stress arrangements close to the first mainshock's fault.

Across each imaginary plane inside a block of rock the Coulomb failure stress σ_c or CFS, is defined as the difference between absolute value of tectonic shear stress on it and frictional stress that resist against rupture;

$$\sigma_c = |\tau| - \mu^* \sigma_n \tag{3}$$

The failure happens when σ_c exceeds a special positive value which depends on internal characteristics of the rock (King *et al.* 1994). Here in this calculate the resultant ΔCFS after the first mainshock for the second mainshock's CMT focal mechanism solutions. The calculations of ΔCFS for calibrated epicentral location (Ghods *et al.* 2015) at 38.425, 46.777 for both nodal planes is illustrated in Figure 10. Regarding to the calculated centroid and hypocentral depth for the second mainshock, we considered a depth range of 12 ± 2 km for ΔCFS estimations. As it is evident the mean of ΔCFS for depth range 10 to 14 km shows how the north west of the first mainshock is significantly charged for left-lateral striking along north-south direction and uncharged for right-lateral striking along east-west direction. This result fortifies previous arguments that consider the north-south oriented plane for the second mainshock.

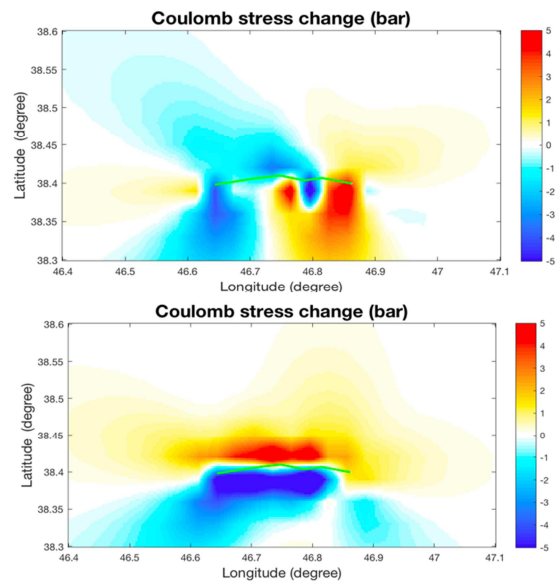


Figure 10: Changes in Coulomb failure stress due to the first shock for both east-west (up) and north-south (down) planes of the second large shock CMT focal mechanism solution.

Hereafter, in order to introduce a source model for the second mainshock on the north-south CMT solution we consider and the hypocenter distribution relocated events (Fig. 3) we propose a 12x10 km ruptured area in accordance with Mw=6.2 (Wells and Coppersmith 1994). Such plane dips down with an angle of 50 to 19.66 km depth. In order to avoid any unknown complexity about the slip model and make a simple uniform model, six concentric planes are used to smooth the slip at fault's edges. This way maximum slip at the central area reaches to 105 cm which result a total seismic moment of 2.2×10^{25} Dyne. cm and Mw=6.2 (Aki, 1966, Stirling et al. 2013)

6. Δ CFS on optimum failure directions

A established tectonic stress that address a block of rock at depth, produces different shear stresses along different orientations in the block. For a rock subjected to principal tectonic compressive stresses $\vec{\sigma}_1$, $\vec{\sigma}_2$ and $\vec{\sigma}_3$ where $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, it can be shown that the maximum of CFS lays on a plane parallel the intermediate stress $\vec{\sigma}_2$ direction. This plane makes an angle of $\pm\theta$ with the greatest principal stress $\vec{\sigma}_1$ (King et al. 1994) where angle θ directly depends of the effective coefficient of friction μ^* .

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{1}{\mu^*} \quad (4)$$

Optimum faulting orientations expose the closest plane for further seismic ruptures. Although, in most cases we are dealing with established faults not future failures. These existing faults are planes of weakness and in another words their existence is changing the isotropic condition of the overburden blocks. However, Ghods et al. (2015) remarking the consistency of independently determined stress field, suggest that all the quaternary faults in the Ahar-Varzeghan area are potentially active and may remain aseismic for long time. Their results present the modern stress field of area with a maximum horizontal compressive stress σ_1 which on average is oriented along \sim N128.5E. Let's consider that the smallest principal compressive stress $\vec{\sigma}_3$ is horizontal and $\vec{\sigma}_2$ vertical ($\vec{\sigma}_1$ and $\vec{\sigma}_3$ have no plunge). Therefor CFS gets larger on a vertical plane with strikes on \sim 128.5° \pm 34.1° applying $\mu^* = 0.4$ for pure strike-slip.

On the other hand the stress state calculated using fault kinematics data reveal a compressional stress arrangement in the area with $\vec{\sigma}_3$ vertical (Ghods et al. 2015). Thus the planes with maximum CFS might have strike along $\vec{\sigma}_2$ or \sim 128.5° \pm 90° with dip of 29.5° ($\mu^* = 0.6$) representing oblique-slip.

Figure 11 shows mean of Δ CFS along mentioned optimum orientations in depth ranges; 4-9 km and 16-21 km and because of the introduced source models for the AV-doublet in section 5. This figure is overlaid with a selection of relocated events in both depth ranges. These selection is done based on a probability value (between 0 and 1) that ETAS modelling assigned to each events and indicates how likely that event belongs to the back ground population. Events with probabilities higher than 0.6 and less than 0.4 are slected for overlaying obtained Δ CFS maps.

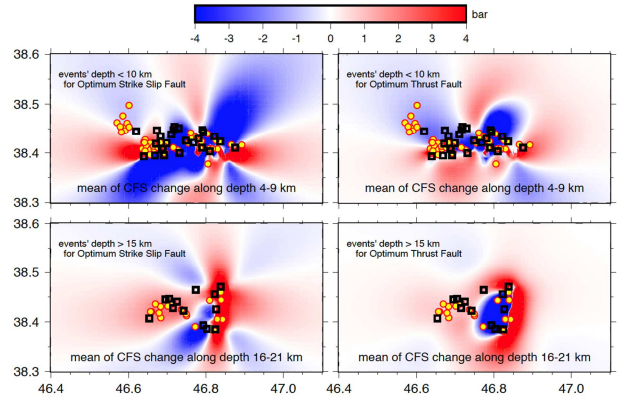


Figure 11: The result of Δ CFS overlaid with events with probability of being of background population greater and equal to 0.6 (black squares) and less than and equal to 0.4 (yellow

7. Conclusions

The 2012 Ahar-Varzeghan double earthquakes standing among the largest events observed in this area destroyed many villages and provoked serious damages and losses (more than 300 deaths). Such catastrophic aspect together with the unknown ruptured faults and lake of seismological knowledge about the area, lately encouraged many semiologist and geologist to investigate this zone. In this paper the temporal evolution of the earthquake-triggering rate is estimated applying ETAS modeling. The result shows more than 55% contribution of aftershocks among over 820 events with $M \geq 2.5$.

The α -value=1.61 which determine the magnitude dependence of the triggering mechanism is less than 2.3 which is expected for static stress triggering as the main earthquake generation process (Hainzl et al. 2010). This medium α -value together with b-value less than 1 are slightly indicating a higher level of confining stress that might be influencing the background seismicity in the area.

In this study we also tried to characterize a new source model mainly based on field measurements and geomorphological observations by Ghods et al. (2015). The constructed source model with five 14 km vertically dipped segments makes a fault with 19 km length along east-west orientation (Fig. 7). We run Δ CFS calculation due to the first shock with an introduced cushion slip model. The result coincides with positive Δ CFS for north-south nodal plane (CMT solution) for the second large shock at its hypocenter location given by Ghods et al. (2015). In contrary, we observe negative Δ CFS for east-west strike-slip focal mechanism at this place. Accordingly, a perpendicular faulting geometry is suggested as the AV-doublet source. This double plane consists of a vertically dipped east-west plane along 19 km at shallow depth (0-14 km) and an eastward dipped north-south oriented plane along 12 km at higher depth (\sim 12-20 km).

The associated Δ CFS because of the AV-doublet was calculated along optimum planes of ruptures respecting to the modern stress regime in the area. The positive Δ CFS areas are expected to be where the aftershock seismicity have significant contribution. Mainly because the internal elastic loading is addressing these weaker orientations (Stein et al. 1994). As it is illustrated in

Figure 11 at higher depth aftershocks are pretty well placed on the charged zones whereas in the shallower depth the portion of aftershocks in discharged areas is not neglectable. Nevertheless, not all the aftershocks occur on optimally oriented ruptures and the probability of being from the background seismicity is taken from

only one sample. Indeed, bootstrapping is needed for having a more precise selection of events with aftershock attribution.

Mentioned facts together with limitation of our database in terms of the amount of provided phases and missed depth errors are directly affecting any spatial analysis.

References

- AKI, K., 1966. Generation and Propagation of G Waves from the Niigata Earthquake of June 16, 1964: Part 1. A statistical analysis. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, **44**, pp. 23-72.
- BERBERIAN, M. and ARSHADI, S., 1976. On the evidence of the youngest activity of the North Tabriz Fault and the seismicity of Tabriz city. *Geological Survey of Iran Report*. Iran: Geological Survey of Iran.
- COPLEY, A., FARIDI, M., GHORASHI, M., HOLLINGSWORTH, J., JACKSON, J., NAZARI, H., OVEISI, B. and TALEBIAN, M., 2014. The 2012 August 11 Ahar earthquakes: consequences for tectonics and earthquake hazard in the Turkish-Iranian Plateau. *Geophysical Journal International*, **196**, pp. 15-21.
- DJAMOUR, Y., VERNANT, P., NANKALI, H. R. and TAVAKOLI, F., 2011. NW Iran-eastern Turkey present-day kinematics: Results from the Iranian permanent GPS network. *Earth and Planetary Science Letters*, **307**, pp. 27-34.
- DONNER, S., GHODS, A., KRUGER, F., ROSSLER, D., LANDGRAF, A. and BALLATO, P., 2015. The Ahar-Varzeghan Earthquake Doublet (M-w 6.4 and 6.2) of 11 August 2012: Regional Seismic Moment Tensors. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **105**, pp. 791-807.
- GHODS, A., SHABANIAN, E., BERGMAN, E., FARIDI, M., DONNER, S., MORTEZANEJAD, G. and AZIZ-ZANJANI, A., 2015. The Varzaghan–Ahar, Iran, Earthquake Doublet (Mw6.4, 6.2): implications for the geodynamics of northwest Iran. *Geophysical Journal International*, **203**, pp. 522-540.
- GUTENBERG, B. and RICHTER, C.F., 1956. Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration (second paper). *Bulletin of the seismological society of America*, **46**, pp. 105-145.
- HAINZL, S., BRIETZKE, G.B. and ZOLLER, G., 2010. Quantitative earthquake forecasts resulting from static stress triggering. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, **115**.
- KING, G.C.P., STEIN, R.S. and LIN, J., 1994. STATIC STRESS CHANGES AND THE TRIGGERING OF EARTHQUAKES. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84**, pp. 935-953.
- MARSAN, D., REVERSO, T., HELMSTETTER, A. and ENESCU, B., 2013. Slow slip and aseismic deformation episodes associated with the subducting Pacific plate offshore Japan, revealed by changes in seismicity. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, **118**, pp. 4900-4909.
- OGATA, Y. 1988. STATISTICAL-MODELS FOR EARTHQUAKE OCCURRENCES AND RESIDUAL ANALYSIS FOR POINT-PROCESSES. *Journal of the American Statistical Association*, **83**, pp. 9-27.
- REZAEIFAR, M., KISSLING, E., SHOMALI, Z. H. and SHAHPASAND-ZADEH, M., 2016. 3D crustal structure of the northwest Alborz region (Iran) from local earthquake tomography. *Swiss Journal of Geosciences*, **109**, pp. 389-400.
- SCHOLZ, C.H., 2015. On the stress dependence of the earthquake b value. *Geophysical Research Letters*, **42**, pp. 1399-1402.
- SCHORLEMMER, D., WIEMER, S. and WYSS, M., 2005. Variations in earthquake-size distribution across different stress regimes. *Nature*, **437**, pp. 539-542.
- STEIN, R.S., KING, G.C.P. and LIN, J., 1994. STRESS TRIGGERING OF THE 1994 M=6.7 NORTHRIDGE, CALIFORNIA, EARTHQUAKE BY ITS PREDECESSORS. *Science*, **265**, pp. 1432-1435.
- STIRLING, M., GODED, T., BERRYMAN, K. and LITCHFIELD, N., 2013. Selection of Earthquake Scaling Relationships for Seismic-Hazard Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **103**, pp. 2993-3011.
- UTSU, T., OGATA, Y. and MATSUURA, R.S., 1995. THE CENTENARY OF THE OMORI FORMULA FOR A DECAY LAW OF AFTERSHOCK ACTIVITY. *Journal of Physics of the Earth*, **43**, pp. 1-33.
- WALDHAUSER, F. and ELLSWORTH, W.L., 2000. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **90**, pp. 1353-1368.
- WELLS, D.L. and COPPERSMITH, K.J., 1994. NEW EMPIRICAL RELATIONSHIPS AMONG MAGNITUDE, RUPTURE LENGTH, RUPTURE WIDTH, RUPTURE AREA, AND SURFACE DISPLACEMENT. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84**, pp. 974-1002.
- WIEMER, S. and WYSS, M., 2000. Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the western United States, and Japan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **90**, pp. 859-869.

ESTIMACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN CASTILLA - LA MANCHA PARA LA ELABORACIÓN DEL PLAN ESPECIAL DE EMERGENCIAS

AN ESTIMATION OF THE SEISMIC RISK IN CASTILLA - LA MANCHA IN ORDER TO DEVELOP THE SPECIAL EMERGENCY PROGRAMME

Rocío Romero-Jarén*, Ligia Quirós, Fernando Sorondo, Belén Benito

Dpto. Ingeniería Topográfica y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid, Crta de Valencia km 7, 28031, Madrid, España.
rocio.rjaren@alumnos.upm.es; lquiros@alumnos.upm.es

Abstract:

An estimation of the seismic risk in Castilla - La Mancha (Spain) is set forth in the current work, in order to develop the special emergency programme. To carry out the study it has been necessary to define a multidisciplinary group of experts in each involved discipline: geology and tectonics, seismology, architecture, engineering and geographical information systems. The main aim is to develop different seismic risk maps to provide the basis to elaborate the emergency plans in Castilla - La Mancha. These plans must follow the stipulated guidelines in the seismic risk field. A probabilistic methodology is adopted to define the seismic risk, considering this as the human and material losses in presence of the expected seismic event. The seismic hazard of the area of study is evaluated through return periods of 475 and 975 years, equivalents to exceedance probabilities of 10% and 5% in 50 years respectively. These probabilities are proposed in the framework of the Spanish seismic code "Normativa Sismorresistente Española, NCSE-02", for conventional and special buildings. In a first approach, the study attempt to estimates the expected losses in each city of the overall of Castilla - La Mancha in the presence of the probable movements in 50 and 100 years. The results allow us to make a relative estimation of the seismic risk in different areas, identify those cities which undergo highest damages indexes and which ones would require a more in-depth assessment so as to mitigate the risk. Besides, the results contribute to establish objective priorities to define emergency plans at city scale.

Key words: Geographical Information System, Geophysics, Seismic Hazard, Seismic Risk, Geology

Resumen:

El estudio que se presenta a continuación consiste en la estimación del riesgo sísmico en Castilla - La Mancha (España) para determinar el grado de pérdidas esperadas ante eventuales terremotos futuros. Este trabajo ha sido realizado por un grupo multidisciplinar, compuesto por especialistas en todas las disciplinas involucradas: geología y tectónica, sismología, arquitectura, ingeniería y sistemas de información geográfica. El objetivo global del estudio es la elaboración de mapas de riesgo sísmico que sirvan de base para la elaboración de planes de emergencia en Castilla - La Mancha, siguiendo la directriz básica que Protección Civil tiene encomendada en materia de riesgo sísmico. El riesgo se define siguiendo un planteamiento probabilista, como el grado de pérdidas humanas y materiales ante la acción sísmica esperada en cada punto del territorio con una determinada probabilidad de excedencia o periodo de retorno. En concreto, el estudio se lleva a cabo para periodos de retorno de 475 y 975 años, que equivale a la probabilidad de excedencia del 10 % en 50 años y 5 % en 50 años respectivamente. Estas son las probabilidades adoptadas en la Normativa Sismorresistente Española NCSE-02 para regular el diseño de estructuras de edificación convencionales y de especial importancia. Se ha tratado así de estimar, en una primera aproximación, el grado de pérdidas que cabe esperar en cada término municipal ante los movimientos con las probabilidades mencionadas en toda la Comunidad de Castilla - La Mancha. Los resultados permiten establecer una valoración relativa del riesgo en las diferentes zonas e identificar aquellos municipios que, por su mayor índice de riesgo, requieran estudios de detalle para proceder a su mitigación. Por otro lado, los resultados aportan un criterio objetivo para establecer prioridades en la definición de planes de emergencia a escala municipal.

Palabras clave: Sistema de información geográfica, Geofísica, Peligrosidad sísmica, Riesgo sísmico, Geología

1. Introducción

El presente estudio de riesgo sísmico se ha desarrollado para la Comunidad Autónoma de Castilla - La Mancha con el objetivo global obtener mapas de distintos parámetros indicativos del riesgo al que está expuesto cada término municipal, que sirvan de base para la

elaboración del plan de emergencias de dicha Comunidad Autónoma por parte de Protección Civil.

Según la definición de UNDRO (1979) oficialmente aceptada, el riesgo sísmico, R , en una determinada población, se define tal y como se muestra en la Ec. (1).

$$R = H \cdot V \cdot E \cdot C \quad (1)$$

Donde:

* Corresponding Author: Rocío Romero Jarén, rocio.rjaren@alumnos.upm.es

H es la peligrosidad sísmica que determina el movimiento esperado en la población.

V es la vulnerabilidad de las estructuras.

E es la exposición o densidad de estructuras y habitantes.

C es el coste de reparación o de pérdidas.

Siguiendo estrictamente la definición anterior, el riesgo vendría expresado en términos económicos, que representarían los costes de reparación o reconstrucción por pérdidas ante el movimiento estimado en el cálculo de la peligrosidad. Numerosas variantes han sido propuestas, a fin de expresar el riesgo en otros términos, por ejemplo, porcentaje de un determinado grado de daño en una cierta tipología estructural, daño medio, número de víctimas mortales y heridos, número de viviendas inhabitables, etc.

La elección del índice o parámetro de riesgo depende de la aplicación a la que vaya dirigido el estudio, pero en cualquier caso su estimación requiere conocer: 1) la peligrosidad o amenaza sísmica a la que está expuesta la población, 2) la distribución de vulnerabilidad sobre el parque inmobiliario en la zona, es decir, el número de estructuras de cada tipología o clase de vulnerabilidad, y 3) la relación entre el movimiento de entrada y los daños esperados en cada tipología, es decir, las curvas de fragilidad. Esta es la secuencia de actuación que se sigue en el presente estudio de riesgo, en el que se obtienen, como principales resultados, los daños físicos en las edificaciones (ligero, moderado, extenso, completo), las pérdidas humanas y las pérdidas económicas para los escenarios sísmicos definidos.

Se comienza estimando la amenaza y caracterizando la acción sísmica que sirve como input para el posterior cálculo del riesgo. Se caracterizan así los movimientos esperados por sismos futuros, con dos probabilidades de excedencia: 10 % en 50 años y 5 % en 975 años, movimientos correspondientes a periodos de retorno PR 475 y PR 975 años, respectivamente. Estas probabilidades son las adoptadas por la Normativa Sismorresistente Española, NCSE-02, para regular el diseño de estructuras de edificaciones convencionales (PR 475) y de especial importancia (PR 975)

Para poder realizar las estimaciones de peligrosidad y riesgo sísmico, es necesario construir una base de datos georreferenciada (BD) que, a través de un Sistema de Información Geográfica, permita el almacenamiento, edición, análisis y representación de la información compilada.

El estudio se ha articulado en cinco fases principales (Fig. 1), que se han desarrollado paralela o sucesivamente con el fin de cubrir todos los aspectos que requiere un estudio de riesgo sísmico:

1. Elaboración de la base de datos con toda la información sobre la sismicidad, tectónica, exposición de las viviendas y la población, división administrativa, etc.
2. Evaluación y cálculo de la peligrosidad sísmica.
3. Análisis de la exposición y asignación de vulnerabilidad.

4. Estimación del riesgo sísmico.

5. Creación de un SIG con los resultados de riesgo sísmico.



Figura 1: Organigrama de trabajo con las diferentes fases del estudio (fuente: elaboración propia).

2. Peligrosidad sísmica

La estimación de la peligrosidad sísmica se efectúa teniendo en cuenta todas las fuentes incluidas en un área de influencia de 300 km alrededor del centroide de Castilla - La Mancha. La extensión del área de influencia es la que habitualmente se fija en las normativas.

2.1. Metodología probabilista

La concepción probabilista de la peligrosidad sísmica considera la probabilidad de que se iguale o supere un determinado nivel de movimiento del terreno, como resultado de la acción de terremotos en el área estudio durante un periodo de tiempo especificado.

La Ec. (2) proporciona la peligrosidad en un emplazamiento por una única fuente, dada como probabilidad anual de excedencia de un nivel del movimiento Y del parámetro y .

$$P_{anual}(y > Y) = \lambda_{anual}(y > Y) = \tau \iiint P(y > Y | m, r, \varepsilon) \cdot p(m) \cdot p(r) \cdot p(\varepsilon) dm dr d\varepsilon \quad (2)$$

Donde:

y representa el parámetro de movimiento con el que expresamos la peligrosidad (habitualmente aceleración pico PGA, o aceleración espectral SA (T)).

Y es el valor fijado de movimiento cuya excedencia se evalúa.

τ es la tasa anual de ocurrencia de sismos y se considera constante dentro de una misma fuente.

$p(m)$ se refiere a la función de densidad de probabilidad de la magnitud dentro de cada fuente. Describe la probabilidad de que ocurra un terremoto de una determinada magnitud en la fuente sísmica y representa directamente el denominado efecto de la fuente.

$p(r)$ se refiere a la función de densidad de probabilidad de la distancia. Describe la probabilidad de que si se produce un terremoto en la fuente, su foco se encuentre a una distancia r del emplazamiento de cálculo. Esta función representa la posible localización

de un sismo dentro de la fuente sísmica y se relaciona con el efecto de la atenuación del movimiento a lo largo del trayecto entre la fuente y el emplazamiento.

$p(\varepsilon)$ está relacionada con la función de densidad de probabilidad asociada a la incertidumbre del movimiento que puede registrarse en el emplazamiento debido a un sismo determinado. Así, dadas una magnitud m y una distancia r , cabe esperar distintos niveles de movimiento dada la aleatoriedad del mismo, que se considera mediante una distribución log normal de y en base a observaciones empíricas. El parámetro ε indica precisamente el número de desviaciones estándar que se consideran para estimar y .

$P(y > Y|m, r, \varepsilon)$ es un término de probabilidad que refleja si se produce o no excedencia del nivel de movimiento prefijado al calcular el movimiento esperado para unas variables m , r y ε determinadas. Es por tanto un término que toma dos valores: 1 cuando sí se produce excedencia y 0 en caso contrario.

La integral triple se extiende al rango de variación de las tres variables (m , r y ε) y se resuelve numéricamente, dado que en la mayor parte de los casos no existe solución analítica. Sumando la contribución de todas las zonas se obtiene la tasa anual de excedencia del movimiento o peligrosidad sísmica expresada en términos anuales.

Bajo la hipótesis de que la excedencia del movimiento es un proceso poissoniano, entonces esta probabilidad anual se traduce en una probabilidad en t años mediante la Ec. (3)

$$P(y > Y \text{ en } t \text{ años}) = 1 - e^{-t \cdot \lambda_{\text{anual}}} \quad (3)$$

En concreto, en el presente estudio de peligrosidad se emplean dos métodos de cálculo, ambos de tipo probabilista:

- Método Clásico Zonificado (MCZ), en el que se considera que la sismicidad se distribuye en zonas sismogénicas, cada una de las cuales tiene un potencial sísmico uniforme (Cornell 1968; Esteva 1968).
- Método Híbrido de Zonas y Fallas (MHZF), en el que las fallas activas conocidas son modelizadas como fuentes independientes con su potencial sísmico asociado derivado de la tasa de sismicidad de las fallas y el resto de la sismicidad se reparte en zonas sismogénicas (Rivas 2014).

El cálculo de peligrosidad sísmica engloba distintas fases. Éstas se explican a continuación.

2.2. Fases del estudio de peligrosidad sísmica

2.2.1. Análisis de sismicidad, tectónica y geodinámica de la zona

El acercamiento entre Iberia y África es el motor principal de la deformación activa que se observa en Castilla - La Mancha, denominada deformación Bética. En el interior de la Península se registra un incremento progresivo de los esfuerzos tectónicos con el máximo

acortamiento horizontal en sentido NO-SE (Capote *et al.* 1990). A este incremento se asocia la deformación Intraplaca. El inicio de la transmisión de esfuerzos desde el SE coincide con el final de la actividad orogénica Pirenaica (Muñoz Martín 1997). En el interior peninsular, la transmisión de esfuerzos de origen Bético produce la reorganización del Antepaís Ibérico centro-occidental, lo que se traduce en gran cantidad de deformación intraplaca: con pliegues y cabalgamientos en la corteza superior y fallas transcurrentes con poco salto.

Las publicaciones científicas más recientes que tratan los campos de esfuerzos y deformaciones actuales del oeste de la placa Euroasiática a partir de los últimos datos de velocidades GPS indican que la corteza de la Península Ibérica al norte de la Cordillera Bética forma parte de Eurasia estable, al presentar una velocidad media residual de 0.3 ± 0.1 mm/a con respecto a la Europa estable (Nocquet *et al.* 2012), y no presenta deformaciones internas significativas dentro de la precisión de los datos GPS (Fernandes *et al.* 2007).

Por otro lado, Castilla – La Mancha es un área de amplio interés geológico, que incluye dominios geológicos diversos con evoluciones y características tectónicas distintas, como son las cuencas terciarias, Tajo y Guadalquivir, y los sistemas montañosos del Sistema Central, la Cordillera Ibérica, la parte meridional de la Cordillera Costero-Catalana, la Cordillera Bética Central y Oriental, el Prebético y partes significativas de los relieves antiguos del Macizo Hespérico como los Montes de Toledo, y Sierra Morena.

2.2.2. Elaboración del catálogo de proyecto

Para la elaboración del catálogo de proyecto se ha partido del confeccionado para el nuevo mapa de peligrosidad sísmica de España (MPSE) (IGN-UPM 2012), que contiene registros desde el año 1048 hasta el año 2011, y de una actualización de éste hasta el año 2016, en base al catálogo publicado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN 2016).

2.2.2.1. Homogeneización del catálogo

Un catálogo sísmico es homogéneo, en lo referente al tamaño de sismos, cuando el parámetro que lo define es el mismo para todos los terremotos. Es imprescindible realizar las conversiones pertinentes entre las diferentes estimaciones de magnitud, a fin de obtener un catálogo sísmico homogéneo. En este trabajo se utiliza la magnitud momento M_w como parámetro de tamaño, siguiendo la tendencia actual en estudios de amenaza sísmica.

Para homogeneizar las magnitudes a M_w , se tomaron en cuenta las correlaciones que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Correlaciones obtenidas entre distintos parámetros de tamaño de los sismos y la M_w (regresiones RMA)

Correlación	Rango de aplicación
$M_w = 1.656 + 0.545 \cdot I_{\text{max}}$	III a IX - X
$M_w = 0.290 + 0.973 \cdot m_{\text{bLg(MMS)}}$	3.1 a 7.3
$M_w = -1.528 + 1.213 \cdot m_{\text{b(VC)}}$	3.7 a 6.3
$M_w = 0.676 + 0.836 \cdot m_{\text{bLg(L)}}$	3.0 a 5.1

2.2.2.2. Depuración del catálogo

La sismicidad sigue un modelo poissoniano, asumida en el método zonificado. Implica que la ocurrencia de cualquier terremoto es independiente de la ocurrencia de todos los demás, dentro de una misma fuente sísmica. En realidad, son frecuentes las asociaciones de terremotos en forma de series sísmicas, con un terremoto principal y otros premonitores y/o réplicas. Para verificar la hipótesis de independencia de sismos es necesario, entonces, detectar las series sísmicas e incluir en los cálculos únicamente los eventos principales, eliminando por tanto del catálogo los restantes de una misma serie.

Tras el proceso de depuración se identifican como réplicas un 36.9 % de los registros, de modo que el catálogo depurado cuenta con un total de 7741 terremotos principales.

2.2.2.3. Completitud

Un catálogo sísmico se considera completo si contiene todos los sismos que han ocurrido en el área considerada. El problema es que al remontarnos hacia atrás en el tiempo, la información relativa a terremotos pequeños o no sentidos habitualmente se pierde.

El análisis de completitud consiste en identificar una serie de años de referencia que marcan el inicio del periodo de completitud, para cada zona y para cada rango de magnitudes. En la Tabla 2 se muestran los años de referencia considerados para cada rango de magnitud.

Tabla 2: Años de referencia considerados tras el estudio de completitud

Rango de magnitudes	Catálogo MPSE	Catálogo SE de España
3.0 - 3.4	1985	1978
3.5 - 3.9	1980	1975
4.0 - 4.4	1933	1908
4.5 - 4.9	1910	1883
5.0 - 5.4	1800	1800
5.5 - 5.9	1720	1520
6.0 - 6.4
≥ 6.5

2.2.2.4. Catálogo final de proyecto

En la Tabla 3 se muestran las principales características del catálogo empleado en el presente estudio (Fig. 2).

Tabla 3: Características principales del catálogo empleado en el estudio

Nº de eventos	Periodo temporal	Tipo de magnitud	Rango de magnitudes	Rango de profundidad (km)
7741	1048 – 2016	Momento (M_w)	3.0 – 8.5	0 - 65

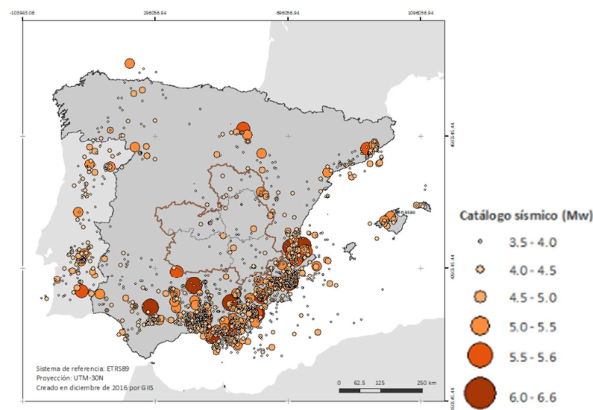


Figura 2: Mapa con la distribución de los sismos considerados en el catálogo de estudio.

2.2.3. Identificación y caracterización de fuentes sísmicas en el área de estudio

Para el cálculo de peligrosidad sísmica se tienen en cuenta dos fuentes generadoras de sismos: fallas activas y zonas sismogénicas.

Para incluir ambos tipos de fuente en el cálculo de peligrosidad, debe caracterizarse su patrón de sismicidad o ley de recurrencia, junto con la magnitud máxima (M_{max}) que cada fuente pueda generar.

2.2.3.1. Fallas activas en el área de estudio

El movimiento brusco en una falla activa genera una liberación de energía que se propaga en forma de ondas. Cuando éstas alcanzan la superficie terrestre, se produce la sacudida sísmica conocida como terremoto.

Para este trabajo se han tenido en cuenta tanto las fallas incluidas en la base de datos de fallas activas del Cuaternario para la Península Ibérica, QAFI v.3 (García-Mayordomo *et al.* 2012a) como las fallas incluidas en el mapa neotectónico de la Península Ibérica (IGME, ENRESA 1998).

En la Comunidad Autónoma de Castilla-La Mancha son muy escasas las fallas con evidencias geológicas directas de actividad cosísmica cuaternaria. No obstante, para el estudio del riesgo sísmico se han tenido en cuenta también las fallas activas que, aun quedando fuera de los límites de esta Comunidad Autónoma, están dentro de la zona de influencia considerada en el estudio (radio de 300 km en torno al centroide de Castilla - La Mancha) (Fig. 3).

Caracterización sísmica de las fallas

La actividad sísmica de las fallas viene dada por el sismo máximo que se espera en cada una y por la tasa de momento sísmico que se acumule, suponiendo que la energía se acumula de forma homogénea en todo el plano de falla.

La magnitud máxima esperada en la falla (o segmento) se obtiene a partir del área del plano de falla o superficie de ruptura (A), considerando que la M_{max} es proporcional a A . Se emplean las correlaciones propuestas en la literatura: Wells and Coppersmith (1994), Stirling *et al.* (2002) y Stirling *et al.* (2008). Se consideran valores promedio entre los estimados con las diferentes correlaciones.

En relación a la tasa de momento acumulada, se supone que en todo el plano de falla se está acumulando energía uniformemente y la tasa de momento sísmico M_0 que se acumula en la falla (moment rate) está relacionada con la tasa de deslizamiento anual de la misma \dot{u} (slip rate) según la ecuación de Brune (1968), Ec. (4):

$$\dot{M}_0 = \mu \cdot \dot{u} \cdot A \quad (4)$$

Donde:

μ es el módulo de rigidez o de cizalla.

\dot{u} es la tasa de deslizamiento.

A es el área del plano de falla.

2.2.3.2. Zonificación sísmica

Además de considerar las fallas como fuentes generadoras de sismos se tienen en cuenta zonas sismogénicas para así contemplar la sismicidad que no está claramente asociada a las fallas identificadas. Estas zonas se consideran con potencial sísmico homogéneo y a cada una de ellas se asocia un patrón de sismicidad definido.

Se ha considerado la zonificación de García-Mayordomo (2010), desarrollada a partir de la reunión científica IBERFAULT 2010. Esta zonificación aporta una visión geológica general de la región de estudio y considera criterios sísmicos, geológicos, tectónicos y reológicos a la hora de la definición y caracterización de las zonas, dando distintos pesos a cada tipo de dato. La zonificación aporta además, parámetros de actividad de las fallas activas a partir de datos geológicos, cuando éstos datos están disponibles.

Se han considerado aquellas zonas que intersecan con el área de influencia del estudio (Fig. 3).

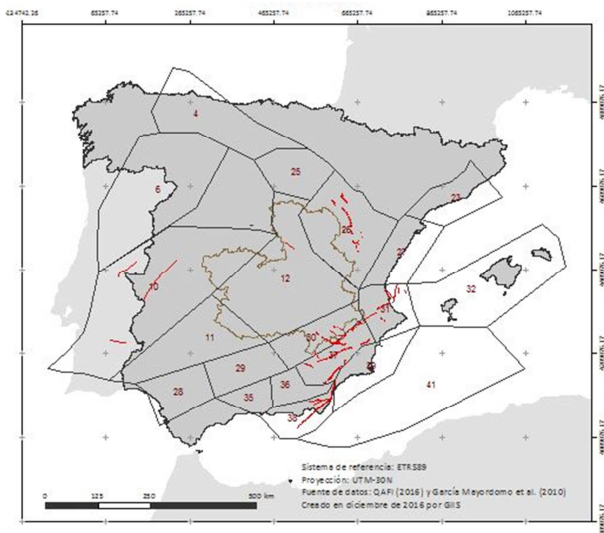


Figura 3: Zonificación de Iberfault (2010) y fallas consideradas en el estudio de Castilla - La Mancha (fuente: elaboración propia).

Caracterización sísmica de las zonas

Dentro de cada zona sismogénica, la sismicidad se distribuye de manera aleatoria espacial y temporalmente. Se requiere entonces deducir la ley de

recurrencia de sismos en función de su magnitud, así como la magnitud máxima creíble en la zona.

Para ello, se analiza la distribución de sismos en la zona de estudio, asumiendo el modelo de Gutenberg and Richter (1944) que es el modelo habitualmente empleado en cálculos de peligrosidad siguiendo métodos zonificados, Ec. (5). Este modelo establece que el logaritmo del número de terremotos, N , cuya magnitud es igual o mayor a una magnitud dada, m , está relacionado linealmente con esa magnitud:

$$\log N = a + b \cdot m \quad (5)$$

Donde:

b es una estimación de la proporción entre terremotos grandes y pequeños que ocurren en la zona.

a es un valor que está relacionado con el número de terremotos que supera una magnitud mínima M_0 .

Por otro lado, del catálogo sísmico se puede deducir la M_{max} observada en la zona, pero esta puede ser inferior a la del sismo máximo que pueda ser generado en las fallas existentes. De hecho, el catálogo sísmico suele no cubrir ciclos completos de dichas fallas, sobre todo cuando éstas son fallas lentas como las localizadas en el sureste de España. Por tanto la M_{max} correspondiente al máximo sismo que pueda generarse puede ser superior a la M_{max} observada en el catálogo. Para tener en cuenta esta incertidumbre sobre la M_{max} de cada zona, se ha considerado una distribución Gaussiana (Fig. 4) definida por los parámetros:

- M_{max} (min) magnitud máxima observada en la zona derivada del catálogo sísmico que se identifica con el umbral mínimo de la distribución.
- M_{max} (max) magnitud máxima acorde con la geología de la zona (M_{max} (max)), identificada con el límite máximo de la distribución.
- E (M_{max} (media)) magnitud máxima esperada.
- σ desviación estándar de la distribución de la M_{max} .

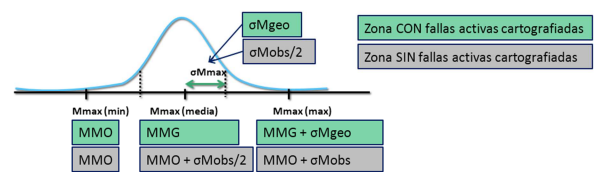


Figura 4: Esquema de definición de las magnitudes de las zonas sismogénicas (fuente: elaboración propia).

2.2.4. Leyes de atenuación o modelos de movimiento fuerte

Tras la caracterización de las fuentes sísmicas, el segundo factor determinante en el cálculo de peligrosidad es la atenuación que experimentan las ondas sísmicas en su recorrido desde la fuente a cada emplazamiento de estudio. Para considerar este efecto deben aplicarse leyes de atenuación, también conocidas como ecuaciones de predicción del movimiento o

GMPEs (del inglés Ground Motion Prediction Equations).

Estas ecuaciones permiten estimar el desplazamiento causado en un cierto emplazamiento por el movimiento generado en la fuente, a una cierta distancia del mismo, proporcionando valores del parámetro característico del movimiento para una magnitud y distancia dadas.

Para seleccionar los modelos más idóneos para su aplicación en Castilla - La Mancha, entre los propuestos en la literatura especializada, se efectúa un contraste de modelos con datos locales, que permita determinar cuáles de esos modelos reproducen mejor la atenuación de nuestra zona. En la Tabla 4 se muestran las características principales de los modelos empleados.

Tabla 4: Características principales de los modelos de atenuación empleados en el estudio

	<i>Abrahamson et al. (2013) (ASK 2013)</i>	<i>Campbell and Bozorgnia (2013) (CB13)</i>
Base de datos	Mundial	Mundial
Componente utilizada para (PGA, SA(T))	Media geométrica	Media geométrica
Tipo de fuente	Cortical	Cortical
Distancia (km)	0 – 300	0 – 300
Mw	3.0 - 8.5	3.0 - 8.5

2.2.5. Efecto local

La naturaleza y la distribución de los daños producidos por la ocurrencia de un terremoto están influenciados por la respuesta del terreno frente a cargas cíclicas. Como consecuencia, se produce una modificación de la señal sísmica, denominada “efecto de sitio”. Dicha respuesta y la magnitud del daño producido están controladas principalmente por las condiciones geológico-geotécnicas de las formaciones geológicas, especialmente por las características dinámicas del terreno.

Por regla general, la presencia de terrenos blandos no consolidados de gran potencia produce un aumento considerable de los daños que se generan en las infraestructuras situadas sobre dichos suelos ante la ocurrencia de un sismo.

La región de Castilla - La Mancha presenta una gran variedad de litologías de distinta génesis y edad. Esta variabilidad litológica da lugar a materiales de diferente resistencia mecánica, que van desde rocas muy duras y competentes, hasta terrenos blandos y muy blandos.

Se han delimitado 9 grupos de materiales en base a las propiedades geológico-geotécnicas y posteriormente, a cada uno de estos grupos, se le ha asignado el grado de amplificación de las ondas sísmicas a partir del valor de velocidad de ondas de cizalla (V_s). Para ello, se ha empleado la normativa FEMA (FEMA 2003). Se ha obtenido así un mapa de clases de con diferente grado de amplificación sobre el movimiento en roca (Fig. 5). En la Tabla 5 se muestra un resumen de las características principales de cada una de estas clases.

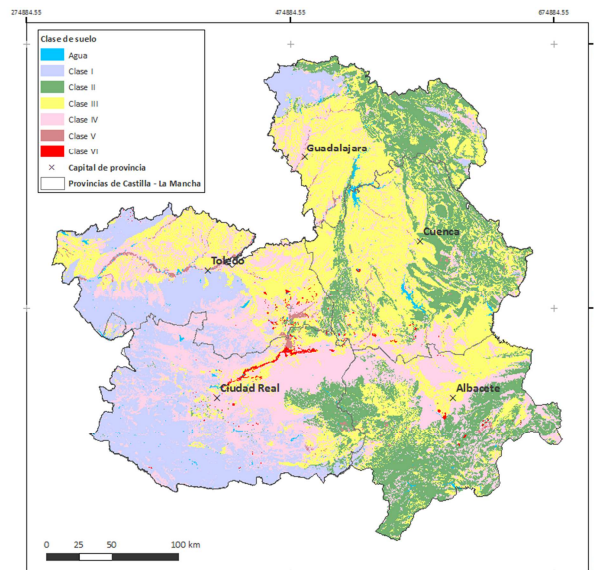


Figura 5: Mapa de clases de suelos localizados en Castilla – La Mancha (fuente: elaboración propia) (fuente: elaboración propia).

Tabla 5: Resumen de las características principales de las clases de suelos localizadas en Castilla – La Mancha

Clase	Descripción geotécnica	V_s (m/s)	Tipo suelo NEHRP
I	Roca muy dura, poco fracturada	> 1500	A
II	Roca dura media, fracturada.	751 - 1500	B
III	Roca de resistencia blanda, muy fracturada.	351 - 750	C
IV	Suelos no cohesivos, poco compactos.	180 - 350	D
V	Suelos cohesivos blandos.	< 100	E
VI	Suelos muy blandos, orgánicos.	< 100	F

2.2.6. Resultados de peligrosidad sísmica con efecto de sitio

En las Figuras 6 y 7 se muestran los resultados de peligrosidad sísmica, considerando el efecto local, en términos de PGA para PR de 475 años y 975 años, respectivamente.

3. Exposición de las edificaciones y población

El Instituto Nacional de Estadística (INE) proporciona información sobre el número de edificios por municipio, así como las características necesarias para un estudio de riesgo sísmico (año de construcción, número de plantas, uso, superficie construida...). Los datos sobre la vivienda publicados por la institución están actualizados hasta el año 2011. En total, en Castilla - La Mancha, y hasta la fecha mencionada, hay registrados 842607 edificios.

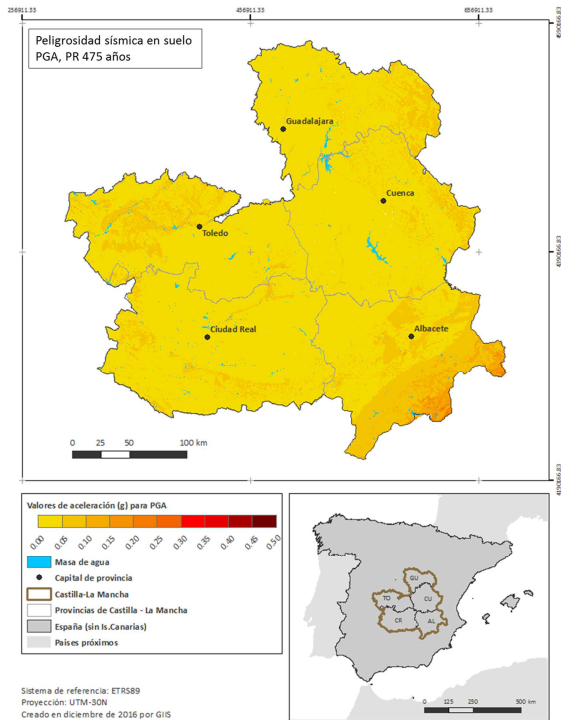


Figura 6: Mapa de peligrosidad sísmica con efecto local de la Comunidad de Castilla - La Mancha (PGA, PR 475 años) (fuente: elaboración propia).

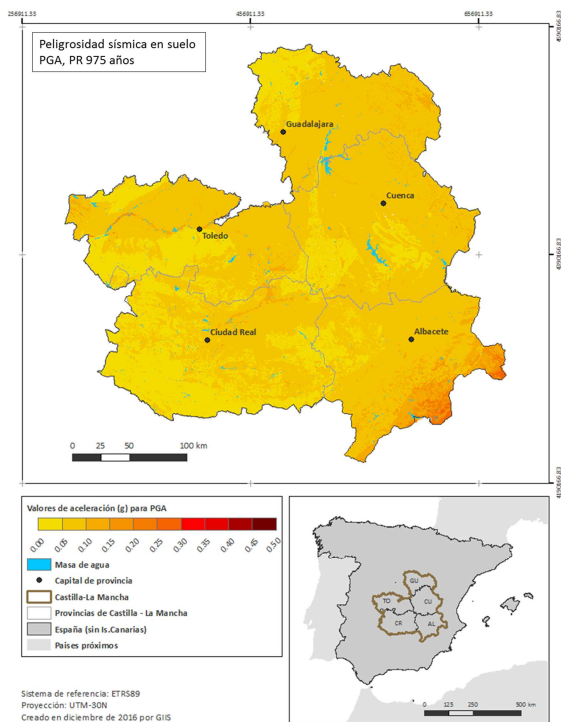


Figura 7: Mapa de peligrosidad sísmica con efecto local de la Comunidad de Castilla - La Mancha (PGA, PR 975 años) (fuente: elaboración propia).

De igual manera, a partir de la información que facilita el INE, es posible conocer el número habitantes por municipio. A fecha de 1 de enero de 2015, en Castilla - La Mancha, hay un total de 2062767 habitantes y la

densidad media es de 26 habitantes por kilómetro cuadrado.

Castilla - La Mancha posee un parque inmobiliario muy heterogéneo, compuesto por edificios antiguos y otros modernos. Se identifican dos grandes grupos de edificaciones de uso residencial:

- Edificaciones tradicionales. Son edificios que se apoyan en conceptos de buena práctica constructiva realizada con anterioridad a las décadas de los 40 o 50.
- Edificación tecnológica. Son construcciones realizadas con un procedimiento de cálculo donde los esfuerzos sobre la estructura son previstos y se desarrollan soluciones específicas para ello. La implantación de la etapa tecnológica sucede a lo largo de varias décadas, pero es útil relacionarla con la publicación de las primeras normas sismorresistentes españolas, que entraron en vigor a partir del año 1962.

3.1. Asignación de vulnerabilidad

El término vulnerabilidad se define como la fragilidad de una edificación ante una acción sísmica. Esta fragilidad viene determinada por las prestaciones sismorresistentes accidentales o proyectadas que posee la estructura, y éstas a su vez, por las características tecnológicas de su composición.

La clasificación de vulnerabilidad de un parque inmobiliario obliga a determinar las tipologías constructivas de los edificios que lo componen, determinar sus prestaciones sismorresistentes, y clasificarlas según la respuesta que puedan tener ante el sismo, todo ello avalado por la literatura científica.

En la Tabla 6 se muestran los principales tipos constructivos localizados en Castilla - La Mancha.

Tabla 6: Tipos constructivos para viviendas más frecuentes localizados en Castilla - La Mancha

Código	Descripción
MPFM	Estructura muraria de piedra sin forjados rígidos
MAFM	Estructura muraria de adobe sin forjados rígidos
MLFM	Estructura muraria de fábrica de ladrillo sin forjados rígidos
MLFH	Estructura muraria de fábrica de ladrillo con forjados rígidos con efecto diafragma
HPAL	Estructura de pórticos de hormigón armado con cerramientos de albañilería

Para asignar clases de vulnerabilidad a las tipologías identificadas en el parque inmobiliario de Castilla - La Mancha se considera la clasificación propuesta en la metodología del proyecto RISK-UE (Milutinovic and Trendafiloski 2003). En la Tabla 7 se muestra la correlación entre las tipologías más representativas para viviendas localizadas en la región de estudio y las consideradas en dicha metodología. Esta correlación se lleva a cabo atendiendo al tipo constructivo y al número de plantas de las edificaciones.

Tabla 7: Correlación entre las tipologías localizadas en Castilla - La Mancha para viviendas y la clasificación de vulnerabilidad según RISK-UE (Milutinovic and Trendafiloski 2003)

Código	1 - 2 plantas	3 - 5 plantas	≥ 6 plantas
MPFM	M1.1 LOW	M1.1 MED	...
MAFM	M1.1 LOW	M1.1 MED	...
MLFM	M3.4 LOW	M3.4 MED	M3.4 HIGH
MLFH	M3.4 LOW	M3.4 MED	M3.4 HIGH
HPAL	RC3.1 LOW	RC3.1 MED	RC3.1 HI

Además, es necesario conocer el nivel de diseño sismorresistente de las estructuras. Se considera que las estructuras murarias no tienen asociado ningún nivel de diseño. Sin embargo, para las estructuras de hormigón armado, definidas como RC3.1 según RISK - UE, es necesario analizar el desarrollo histórico de las normas sismorresistentes de aplicación en Castilla-La Mancha desde 1962 hasta la actualidad.

Finalmente, se considera que las estructuras (RC3.1) construidas entre 1941 y 1994 no tienen asociado ningún nivel de diseño sismorresistente (pre-code) y aquellas que se construyeron a partir de 1995 tienen asociado un nivel de diseño bajo (low-code).

A modo de resumen, en la Figura 8 se muestra la distribución de tipologías estimada para toda Castilla - La Mancha.

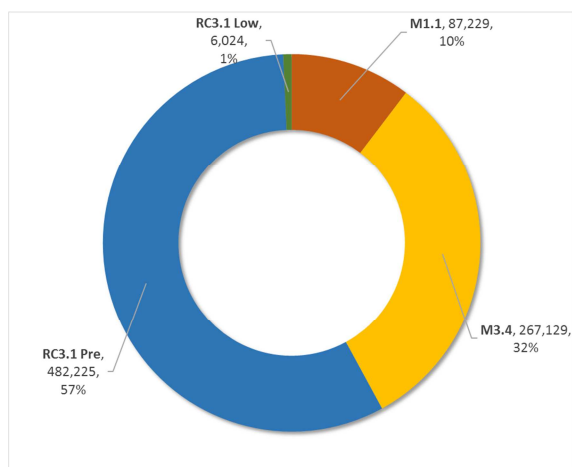


Figura 8: Distribución de la vulnerabilidad del parque inmobiliario (viviendas) de Castilla - La Mancha (fuente: elaboración propia).

4. Base de datos georreferenciada

Como se ha mencionado anteriormente, es necesario crear un SIG que permita gestionar toda la información geográfica que compone la base de datos del proyecto. Esta base de datos debe incluir, al menos, la siguiente información geográfica:

- Zonas sismogénicas.
- Fallas activas.
- Catálogo sísmico.
- Datos administrativos: distritos, secciones censales, límites municipales.

- Elementos expuestos:
 - Datos catastrales: valor catastral, número de edificios y viviendas, superficie construida, etc.
 - Datos de población y ocupación de viviendas

Como unidad de trabajo y representación para los resultados de riesgo sísmico se considera cada uno de los municipios que componen la Comunidad Autónoma (919 municipios).

Para la realización de este estudio se fija como sistema de referencia el ETRS89 (Sistema de Referencia Terrestre Europeo 1989), coincidiendo con el sistema de referencia oficial de España, tal y como aparece publicado en el Boletín Oficial del Estado (BOE) número 207 (BOE 2007). Para la presentación final de resultados, se emplea la proyección UTM (Universal Transversa de Mercator) en el Hemisferio Norte Huso 30.

5. Evaluación del riesgo sísmico

5.1. Cálculo del daño esperado: Método I-DCM

En este estudio se emplea un procedimiento analítico estático no lineal para estimar el daño en los edificios, de acuerdo al movimiento del suelo esperado dado en términos de aceleraciones y desplazamientos espectrales.

Partiendo de la clasificación de los edificios por tipología estructural, con su correspondiente clase de vulnerabilidad asignada, se calcula la probabilidad de que una clase alcance o supere diferentes grados de daño a partir del movimiento máximo esperado en la unidad de estudio.

Para caracterizar la respuesta de las estructuras, se aplica el método de capacidad-demanda. En este método la demanda se identifica con la acción sísmica (mediante el espectro de respuesta) y la capacidad viene dada por la curva que refleja el comportamiento de la estructura (desde el régimen lineal hasta el punto de ruptura). Se determina entonces el punto de desempeño, que corresponde al desplazamiento espectral que se espera que sufra cada tipo de estructura a causa del movimiento sísmico de entrada (demanda). Para calcular el punto de desempeño se emplea el método del coeficiente de desplazamiento mejorado, I-DCM (FEMA 2005), que consiste en modificar la demanda de desplazamiento del sistema lineal de un grado de libertad (SDOF) equivalente a la estructura multiplicándolo por una serie de coeficientes para estimar el desplazamiento máximo del oscilador no lineal.

Por último, se emplean curvas de fragilidad que proporcionan la probabilidad de alcanzar o exceder diferentes grados de daño en función del desplazamiento espectral para el punto de desempeño (Fig. 9).

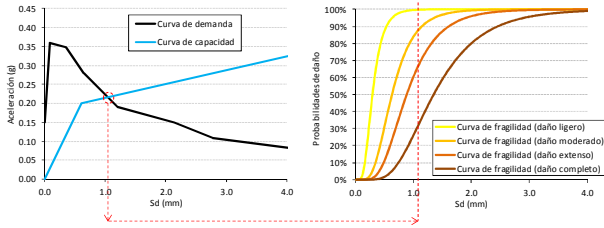


Figura 9. Esquema del método de cálculo de capacidad - demanda (fuente: elaboración propia).

5.1.1. Clasificación y estimación de grados de daño

La clasificación de los grados de daño se basa en la metodología propuesta en RISK-UE (Milutinovic and Trendafiloski 2003). Esta metodología considera una clasificación atendiendo a daños estructurales y no estructurales en edificios de importancia normal, viviendas convencionales (Tabla 8).

Tabla 8: Grados de daño según RISK-UE Milutinovic y Trendafiloski 2003)

Grado de daño	Descripción cualitativa	Daño estructural	Daño no estructural
0	Nulo	Sin Daños	Sin daños
1	Leve	Insignificante a Ligero	Ligero
2	Moderado	Ligero	Moderado
3	Extenso	Moderado	Severo
4	Severo	Muy Severo a Colapso	Muy Severo a Colapso

5.1.2. Índice de daño medio

El índice de daño medio (D_m) es un parámetro de medida del daño en edificios. A través de este índice, se establece el promedio de los daños ocasionados en las estructuras ante la ocurrencia de un evento sísmico. Es un parámetro que varía entre cero y cuatro, siendo cero el equivalente a daño nulo y cuatro el equivalente a daño completo o colapso (Hazu-MH 2003). A partir de la Ec. (6) es posible calcular el D_m .

$$D_m = 0 \times D_n + 1 \times D_l + 2 \times D_m + 3 \times D_e + 4 \times D_c \quad (6)$$

Donde:

D_n es el daño nulo.

D_l es el daño ligero.

D_m es el daño moderado.

D_e es el daño extenso.

D_c es el daño completo.

5.1.3. Otros parámetros de riesgo

A partir de los daños físicos registrados en las viviendas es posible determinar otros parámetros de riesgo como las pérdidas humanas y pérdidas económicas.

La estimación de pérdidas humanas se realiza siguiendo el método empírico de Coburn and Spence (2002), en

función del número de edificios cuyo estado de daño resulte completo (sólo los que se estiman que colapsarían), la densidad de población y la intensidad del movimiento esperado.

Por otro lado, para llevar a cabo la estimación de los costes de reconstrucción o de reparación de las estructuras dañadas (sin tener en cuenta el valor del material contenido en las viviendas) es necesario conocer el valor de construcción por metro cuadrado y la superficie promedio de la vivienda en la zona de estudio.

5.1.4. Resultados de riesgo sísmico

Los resultados de riesgo se han obtenido para cada uno de los municipios de Castilla - La Mancha, representados en mapas que contienen información de distintos parámetros indicativos de las pérdidas esperadas. A continuación, se muestran a modo de ejemplo algunos de los mapas resultantes del presente estudio.

Las Figuras 10, 11, 12, 13 y 14 muestran el índice de daño medio para cada municipio de cada una de las provincias de la Castilla - La Mancha. Los resultados corresponden a un PR de 475 años.

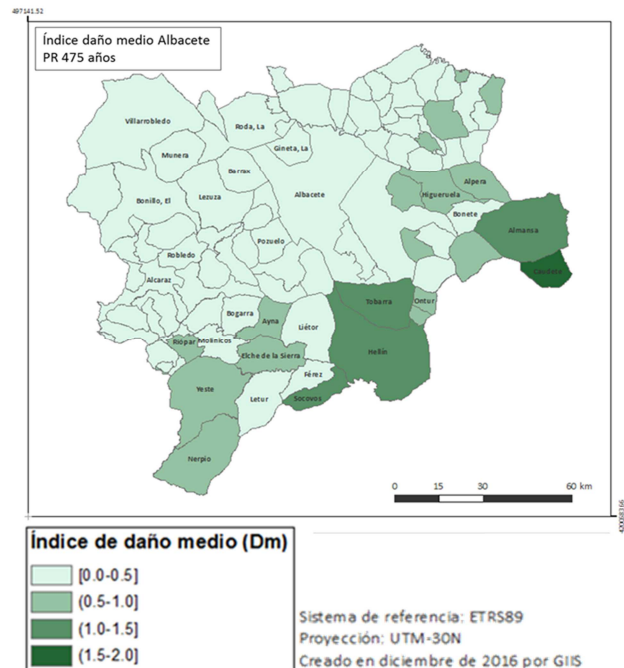


Figura 10. Mapa del índice de daño medio en edificios de viviendas para los municipios de la provincia de Albacete (PR 475 años).

6. Discusión de resultados, conclusiones y recomendaciones

En base al estudio de las características geotécnicas de los materiales geológicos, se concluye que en Castilla - La Mancha dichos materiales presentan poca posibilidad de amplificación. Los materiales que pueden amplificar las ondas sísmicas en superficie (clases III-VI) ocupan el 60 % del total de materiales que afloran en Castilla - La Mancha. Dentro de éstos, el 2,1 % pertenece a materiales de amplificación alta o muy alta. Estos últimos se encuentran próximos a pequeños núcleos de población, como los municipios de Alcázar de San Juan,

Villarrubia de los Ojos, Pedro Muñoz, Lillo y Tembleque, todos ellos pertenecientes a las provincias de Toledo y Ciudad Real.

Los resultados de peligrosidad sísmica con efecto local (Figs. 6 y 7) muestran que para un PR de 475 años los valores máximos de aceleración serían de 0.22 g y para el periodo de retorno de 975 años de 0.28 g.

Del número total de edificios de Castilla-La Mancha, el 42% pertenece a tipologías tradicionales de edificación, (M1.1 y M3.4) mientras que el restante 58% del parque inmobiliario corresponden a edificación tecnológica. Una pequeña proporción del parque inmobiliario, (el 1%) desarrolla prestaciones sismorresistentes por aplicación de las normas NCSE 94 y NCSE 02, y las edificaciones correspondientes se asignan a la tipología RC3.1 Low Code.

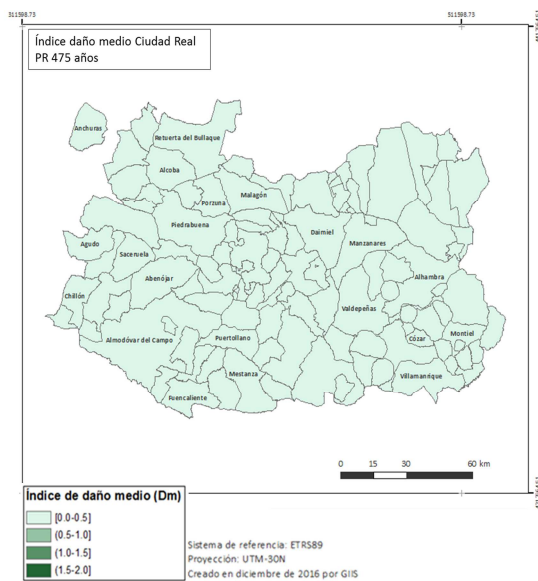


Figura 11. Mapa del índice de daño medio en edificios de viviendas para los municipios de la provincia de Ciudad Real (PR 475 años).

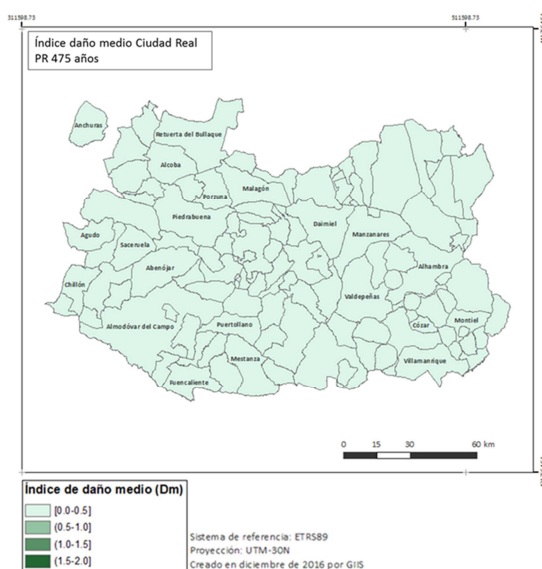


Figura 12. Mapa del índice de daño medio en edificios de viviendas para los municipios de la provincia de Cuenca (PR 475 años).

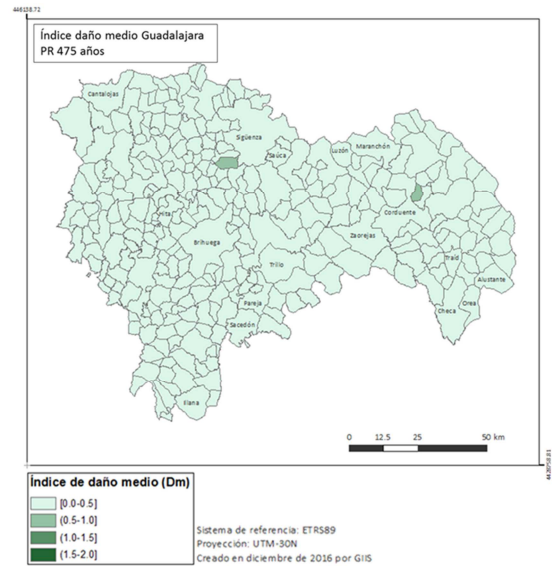


Figura 13. Mapa del índice de daño medio en edificios de viviendas para los municipios de la provincia de Guadalajara (PR 475 años).

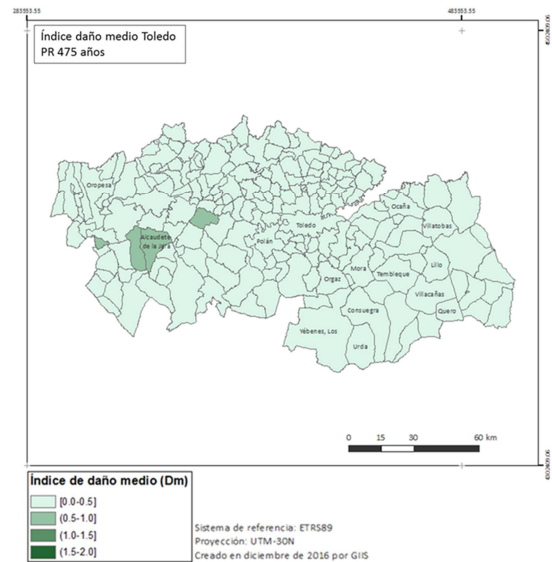


Figura 14. Mapa del índice de daño medio en edificios de viviendas para los municipios de la provincia de Toledo (PR 475 años).

Con respecto al índice de daño medio (Figs. 10, 11, 12, 13 y 14) se puede observar que, como máximo, se alcanzan valores cercanos a 2 en la provincia de Albacete, correspondiente a un Daño Moderado. La mayoría de los municipios de la Comunidad muestran valores inferiores a 1, lo que indica que la mayor parte de los edificios de la Castilla - La Mancha no se verán afectados, o tendrán únicamente daños ligeros, por los movimientos sísmicos esperados con probabilidad de excedencia del 10 % en 50 años.

A partir de los resultados obtenidos se considera adecuado el cálculo de la peligrosidad sísmica con un enfoque probabilista - determinista, definiendo escenarios sísmicos mas concretos y efectuando el posterior cálculo del riesgo sísmico, para la provincia de Albacete (provincia con resultados mayores de daño).

Los resultados del estudio se han facilitado a Protección Civil de Castilla La Mancha en dos tipos de herramientas:

- Un SIG, que permite el almacenamiento y gestión de los datos y resultados derivados de cada fase del trabajo.
- Un visualizador que facilita el uso de la información geográfica a profesionales de diversas áreas que no necesariamente tienen amplios conocimientos de SIG.

Las dos herramientas permiten que las instituciones destinadas a la elaboración de planes de emergencias establezcan prioridades de actuación, dimensionen los recursos para abordar la emergencia en cada municipio y tomen las decisiones oportunas para mitigación del riesgo.

Agradecimientos

Por un lado, agradecimiento especial al grupo de investigación "Geodinámica planetaria, tectónica activa y aplicaciones a riesgos" de la Universidad Complutense de Madrid por su gran colaboración en referencia al análisis de la tectónica y sismicidad de la zona, la estimación de las características geotécnicas de la zona de estudio y la definición del efecto local.

De igual manera, se agradece a Patrick Murphy por su aportación en el área de exposición de las viviendas y la clasificación de las mismas en función de su vulnerabilidad.

References

- ABRAHAMSON N.A., SILVA W.J. and KAMAI R., 2013. Update of the AS08 Ground-Motion Prediction Equations Based on the NGA-West2 Data Set. PEER 2013/04.
- BOE, 2007. Boletín Oficial del Estado del 29 de julio de 2007 en el que se publica el "REAL DECRETO 1071/2007, de 27 de julio, por el que se regula el sistema geodésico de referencia oficial en España". 27: 35986 - 35989. Available: <http://www.boe.es/boe/dias/2007/08/29/pdfs/A35986-35989.pdf>
- BRUNE J.N., 1968. Seismic moment, seismicity, and rate of slip along major fault zones. *Journal of Geophysical Research*. **73**, pp. 777–784.
- CORNELL C.A., 1968. Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*. **58**, pp. 1583-1606.
- CAMPBELL K.W. and BOZORGNIA Y., 2013. NGAWest2 Campbell-Bozorgnia Ground Motion Model for the Horizontal Components of PGA, PGV, and 5%-Damped Elastic Pseudo-Acceleration Response Spectra for Periods Ranging from 0.01 to 10 s. PEER 2013/06.
- CAPOTE, R., DE VICENTE, G. and GONZÁLEZ-CASADO, J.M., 1990. Evolución de las deformaciones alpinas en el Sistema Central Español (S.C.E.). *Geogaceta* **7**, pp. 20–22.
- COBURN, A. and SPENCE, R., 2002. *Earthquake protection*. 2nd edition. Ed. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK.
- ESTEVA, L., 1968. Bases para la formulación de diseño sísmico (Doctoral dissertation, PhD thesis, Faculty of engineering, UNAM).
- FEMA, 2003. HAZUS-MH MR4 Technical Manual. Washington, D.C.
- FEMA, 2005. Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, FEMA 440, Prepared by Applied Technology Council (ATC-55 Project), Washington, D.C., United States, June 2005.
- FEMA, 2005. HAZUS-MH MR4 Technical Manual. Washington, D.C. Federal Emergency Management Agency (2005). Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, FEMA 440, Prepared by Applied Technology Council (ATC-55 Project), Washington, D.C., United States, June 2005.
- FERNANDES, R. M. S., MIRANDA, J.M., MEIJNINGER, B.M.L., BOS, M.S., NOOMEN, R., BASTOS, L., AMBROSIUS, B.A.C. and RIVA, E.M., 2007. Surface velocity field of the Ibero-Maghrebian segment of the Eurasia-Nubia plate boundary. *Geophysical Journal International* **169**(1), pp. 315–324.
- GARCÍA-MAYORDOMO J., INSUA-ARÉVALO J., MARTÍNEZ-DÍAZ J., PEREA H., ÁLVAREZ-GÓMEZ J.A., MARTÍN-GONZÁLEZ F., GONZÁLEZ A., LAFUENTE P., PÉREZ-LÓPEZ R., RODRÍGUEZ-PASCUA M.A., GINER-ROBLES J., AZAÑÓN J.M., MASANA E. and MORENO X., 2010. Modelo integral de zonas sísmogénicas de España. Resúmenes de la 1ª Reunión Ibérica sobre Fallas Activas y Paleosismología, Sigüenza, España.
- GARCÍA-MAYORDOMO J., INSUA-ARÉVALO J.M., MARTÍNEZ-DÍAZ J.J., JIMÉNEZ-DÍAZ A., MARTÍN-BANDA R., MARTÍN-ALFAGEME S., ÁLVAREZ-GÓMEZ J.A., RODRÍGUEZ-PECES M., PÉREZ-LÓPEZ R., RODRÍGUEZ-PASCUA M.A., MASANA E., PEREA H., MARTÍN-GONZÁLEZ F., GINER-ROBLES J., NEMSER E.S., CABRAL J. and THE QAFI COMPILERS., 2012a. La Base de Datos de Fallas Activas en el Cuaternario de Iberia (QAFI v.2.0). *Journal of Iberian Geology*, **38**(1), pp. 285-302.
- GUTENBERG B. and RICHTER C.F., 1944. Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*. **34**, pp. 185-188.

- HAZUS, M.H., 2003. Multi-hazard Loss Estimation Methodology. Technical manual. Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington DC, USA. pp. 712.
- IGME, ENRESA, 1998. Mapas Neotectónico y Sismotectónico de España a escala 1:1.000.000. Vol. I (237 pp.) y Vol. II, 167 pages.
- IGN, INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL, 2016. Catálogo de Terremotos. Disponible en: <http://www.ign.es/web/ign/portal/sis-catalogo-terremotos>.
- IGN-UPM, GRUPO DE TRABAJO, 2012. Actualización de Mapas de Peligrosidad Sísmica de España 2012. Editorial Centro Nacional de Información Geográfica, Madrid. ISBN: 978-84-416-2685-0.
- MILUTINOVIC, Z.V. and TRENDAFILOSKI, G.S., 2003. An advanced approach to earthquake Risk scenarios with 87 applications to different European towns. WP4: Vulnerability of current buildings, pp. 110.
- MUÑOZ-MARTÍN, A., 1997. Evolución geodinámica del borde oriental de la cuenca del Tajo desde el Oligoceno hasta la actualidad. Ph. Thesis, Univ. Complutense de Madrid, 331 pp.
- NOCQUET, J.M., 2012. Present-day kinematics of the Mediterranean: A comprehensive overview of GPS results, *Tectonophysics* **579**, pp. 220–242.
- PEROUSE, E., VERNANT, P., CHERY, J., REILINGER, R. and MCCLUSKY, S., 2010. Active surface deformation and sub-lithospheric processes in the western Mediterranean constrained by numerical models. *Geology* **38**(9), pp. 823–826 Boulder.
- RIVAS-MEDINA A., 2014. Contribución metodológica para incorporar fallas activas en la modelización de la fuente dirigida a estimaciones de peligrosidad sísmica. Aplicación al sur de España. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- SEBER, D., BARAZANGI, M., IBENBRAHIM, A. and DEMNATI, A., 1996. Geophysical evidence for lithospheric delamination beneath the Alboran Sea and Rif–Betic mountains. *Nature* **379**, pp. 785–790.
- STIRLING M.W., MCVERRY G.H. and BERRYMAN K.R., 2002. A new seismic hazard model of New Zealand. *Bulletin of the Seismological Society of America*. **92**, pp. 1878-1903.
- STIRLING, M.W., GERSTENBERGER, M.C., LITCHFIELD, N.J., MCVERRY, G.H., SMITH, W.D., PETTINGA, J. and BARNES, P., 2008. Seismic hazard of the Canterbury region, New Zealand: New earthquake source model and methodology. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*. **41**, pp. 51–67.
- UNDRO, 1979. Natural Disasters and Vulnerability Analysis, Report of Experts group meeting, Genova, Julio 1979.
- WELLS D.L. AND COPPERSMITH K.J., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*. **84**, pp. 974-1002.

INFLUENCIA DEL ESPECTRO SÍSMICO EN LOS EFECTOS DE LOS TERREMOTOS EN LAS EDIFICACIONES

SEISMIC SPECTRUMS INFLUENCE IN BUILDING STRUCTURAL DAMAGE

Laura Navas Sánchez*, Jaime Cervera Bravo, Belén Benito Oterino

Universidad Politécnica de Madrid, Crta de Valencia km 7, 28031, Madrid, España. laura7.1@hotmail.com

Abstract:

This project aims to analyse the influence that the response spectrum form may have in the damage that a building structure suffers. In order to demonstrate, two different buildings have been modelled: the first represents a typical construction situated in Lorca, which has a long fundamental period. And another which has a short fundamental period, whose singular design allows us to extract some conclusions about the influence of certain factors such as irregularities or torsion effects. Besides, it will be applied in both buildings two different seisms: a short and a long-period response spectrum, so as to study the resonance phenomenon. In addition, it will be exposed briefly the most important changes that have suffered the seismic codes according to the seismic design of building structures.

Key words: Seismic Spectrum, Structures, Building, 3D Structural Modelling

Resumen:

En el presente trabajo se analiza la influencia que puede tener el espectro de respuesta en el daño que una edificación puede sufrir. Para ello, se modelan dos edificios: uno en Lorca, representativo de la tipología estructural del lugar y un edificio singular que, por sus irregularidades, permite extraer conclusiones sobre la influencia del diseño de la estructura en su resistencia frente al sismo. Además, a ambos se los somete a dos espectros sísmicos distintos: uno con un espectro de respuesta de periodo largo, el ocurrido en Mayo de 2011 en Lorca, y otro de periodo corto, el ocurrido en Avezano, Italia en Octubre de 2016. Finalmente, se incluyen algunos apuntes sobre los avances en materia sísmica de las normativas y su influencia en el diseño antisísmico.

Palabras clave: Espectro sísmico, Estructuras, Edificación, Modelización 3D

1. Introducción

En los últimos años los mapas sísmicos de las normativas han sufrido importantes modificaciones. Estas obligarían a algunos edificios ya construidos a sufrir incrementos notables de resistencia para cumplir con los requisitos actuales.

Además, se ha constatado en diversos estudios, que los espectros de respuesta de terremotos recientes, como el ocurrido en Lorca, difieren notablemente de los establecidos por las normativas sismorresistentes españolas (Benito *et al.* 2012). Tanto las normativas ya derogadas, PDS-1 (1974) y NCSE-94, como la actual, NCSE-02, presentan espectros que dejan a determinados edificios sin la suficiente seguridad.

Puesto que la situación más desfavorable para la estructura es que se produzca el fenómeno de resonancia edificio – sismo, y esto sucede cuando el periodo a fundamental de una estructura está cerca del periodo predominante del movimiento sísmico generado, es necesario realizar el análisis considerando ambos parámetros.

Al mismo tiempo, existe una considerable incertidumbre a la hora de conocer el periodo natural real de una estructura. Los programas de cálculo modernos

permiten una buena aproximación, pero dejan de lado factores de considerable influencia, como son los cerramientos o incluso las escaleras, que aportan bastante rigidez al sistema real.

El principal objetivo de este trabajo es evaluar la influencia que el contenido frecuencial del movimiento, representado por el espectro de respuesta, puede tener, tanto en un edificio representativo de la arquitectura española de los años 70, como en un edificio de diseño singular.

Estos se eligen con la intención de que permitan evaluar el efecto de resonancia edificio – sismo ya mencionado; por lo que se opta por un edificio de periodo fundamental corto y otro de periodo largo. Ambos se analizan, con apoyo del programa SAP2000, bajo los efectos de dos sismos también de diferente contenido espectral, uno de periodo predominante corto y otro de largo periodo.

2. Metodología

Las normativas sísmicas, desde su aparición, permiten estimar la frecuencia o el periodo natural de vibración de una estructura en función de parámetros como el número de plantas y el material de construcción.

* Corresponding Author: Laura Navas Sánchez, laura7.1@hotmail.com

Sin embargo, en este trabajo se realizará un cálculo más preciso de dicho periodo gracias a las posibilidades de los programas de cálculo actuales. Se pretende de esta forma hallar la respuesta real de los edificios analizados ante los espectros de respuesta de los movimientos considerados, con la máxima precisión posible.

Se seleccionan los siguientes edificios:

- Un edificio residencial de periodo largo, situado en la localidad Lorca, Murcia. Construido en la década de los 70, cuenta con 5 plantas y un periodo fundamental que supera los 0,5 segundos en cualquier caso (Fig.1).
- La biblioteca pública de Viana Do Castelo, Portugal, proyectada por el arquitecto Álvaro Siza Vieira y construida en el año 2004. Es un edificio de periodo fundamental corto, entorno a 0.1s, que consta únicamente de planta baja y primera, siendo especialmente singular su irregularidad estructural tanto en planta como en alzado a efectos sísmicos. (Fig. 2)

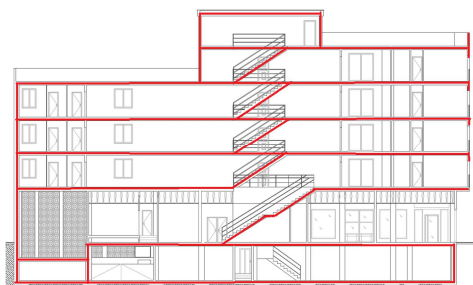


Figura 1: Fotografía y sección transversal del edificio de Lorca.



Figura 2: Fotografía de la biblioteca pública de Viana Do Castelo.

Acorde a los edificios seleccionados se eligen los espectros de respuesta de los siguientes movimientos sísmicos (Fig. 3):

- De periodo corto: el espectro de respuesta del terremoto principal que tuvo lugar en la

localidad de Lorca, Murcia, el 11 Mayo de 2011. Concretamente se considera el espectro correspondiente al acelerograma registrado en la estación más cercana, en la dirección N30W, que es la máxima componente horizontal.

- De periodo largo: el espectro de respuesta del sismo ocurrido en Avezzano, Italia (30-10-2016, 6.5 Mw y RAN Station AVZ). Dicho espectro se extrae de la base de datos Center for Engineering Strong Motion Data (CEMD) y se escala con una relación de 0.93 para que los picos de aceleración (PGA) de los dos movimientos considerados sean similares. Esto se realiza con el objetivo de reducir el efecto de la intensidad del movimiento para centrarnos sobre todo en su contenido espectral, es decir en la forma del espectro.

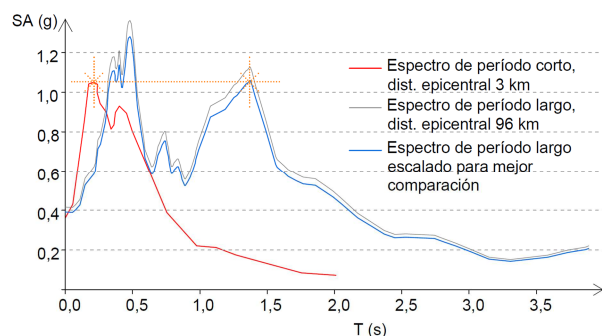


Figura 3: Espectros utilizados para el estudio comparativo.

Mientras el modelado del edificio residencial se realiza con elementos lineales que representan las propiedades de sus soportes y vigas de HA (Fig. 4); para la biblioteca pública de Viana Do Castelo es necesario realizar un modelo de elementos finitos que permita definir su complejo funcionamiento estructural (Navas-Sánchez 2016). Se modela con lasjas de hormigón postesado HP-50 y muros de hormigón armado HA-50 (Fig. 5). Cabe mencionar que la estructura real esta realizada con acero.

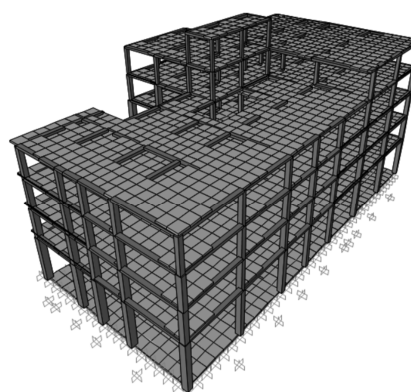


Figura 4: Vista 3D de los modelos introducidos en el programa SAP2000: Edificio residencial en Lorca.

3. Modos fundamentales de vibración y combinación de modos

Se observan los modos fundamentales de vibración, es decir, las formas de movimiento de la estructura que requieren menor cantidad de energía para movilizarse

(Clough and Penzien 2013) que a continuación se describen.

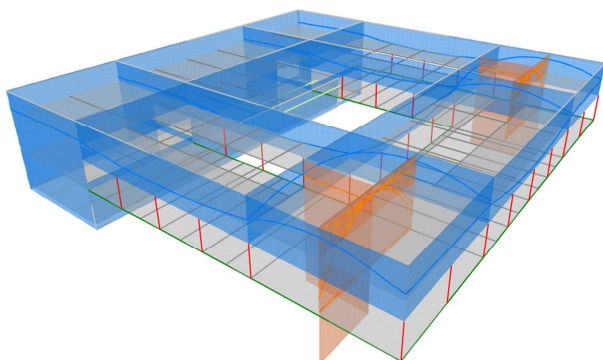


Figura 5: Vista 3D de los modelos introducidos en el programa SAP2000: Biblioteca Viana Do Castelo.

Además, para hallar los esfuerzos y deformaciones resultantes, se realiza en ambos casos una combinación de modos de tipo CQC (Combinación Cuadrática Completa); de forma que se considere el acoplamiento modal entre modos de vibrar parecidos (Wilson 2002).

3.1. Edificio residencial en Lorca de largo periodo fundamental

El periodo fundamental T varía según el procedimiento de cálculo utilizado, siendo especialmente relevantes los siguientes resultados:

- Según la Normativa PDS-1, de obligado cumplimiento en el año de construcción del edificio (1978): $T = 0,38$ s (por lo que se toma el mínimo normativo de 0,5 segundos).
- Según la Normativa española vigente, NCSE-02: $T = 0,45$ s.
- Según la Normativa europea vigente, EN-1998: $T = 0,45$ s.
- Según el Modelado con la rigidez bruta en el programa SAP2000: $T = 0,83$ s.
- Según el Modelado con la rigidez fisurada, propuesto por EN-1998 en su apartado 4.3.1 (7) en el 50 % de la rigidez bruta: $T = 1,22$ s. (Fig. 6).

El motivo de considerar rigidez fisurada es la progresiva degradación que sufren algunos materiales al ser sometidos a cargas cíclicas, como puede ser un sismo. El hecho de que el modelado refleje unos periodos señaladamente superiores a los predichos por la normativa revela la influencia en la estimación de la rigidez derivada de la contrastada dificultad de incorporar los elementos secundarios como son las escaleras o los cerramientos y particiones en los modelos habituales en la práctica profesional: como tales elementos no son de relevancia particular en la respuesta resistente, y difíciles de modelar, no se tienen usualmente en cuenta, alterando a la baja la rigidez inicial del edificio real.

Como puede observarse, el modo fundamental implica torsiones, lo que cabe esperar en edificios con posiciones excéntricas en los núcleos de comunicación, aun cuando no se trate de núcleos rígidos, dada la

alteración en las dimensiones típicas de estos respecto a las usuales asociadas a los usos principales del edificio.

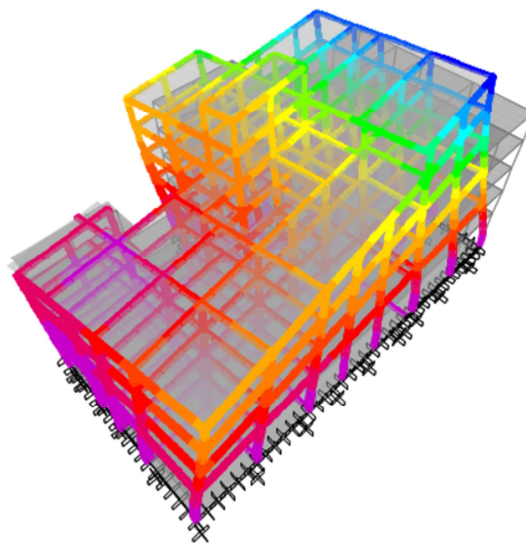


Figura 6: Modo fundamental de vibración del edificio residencial en Lorca. Deformación normalizada por SAP2000 respecto a la situación sin carga (en gris).

3.2. Biblioteca pública V.Do Castelo de corto periodo fundamental

En este edificio se observa una importante coincidencia entre el período del modo fundamental de torsión global, calculado mediante el apoyo del programa informático, y el predicho por la norma:

- Según la Normativa española vigente, NCSE-02: $T = 0,11$ s.
- Según la Normativa europea vigente, EN-1998: $T = 0,13$ s.
- Según el Modelado con la rigidez fisurada, propuesto por EN-1998 en su apartado 4.3.1 (7) en el 50 % de la rigidez bruta: $T = 0,14$ s (Fig. 7).

En este caso el modo fundamental global es de torsión, como se puede observar en la Figura 7. Como era de esperar, la zona apoyada en los muros en L es mucho menos rígida, por lo que los centros de rigidez y de masas están desplazados entre sí y con respecto al centro del cuadrado que define el edificio.

Las normativas desaconsejan este tipo de diseño en zonas sísmicas, debido a que provocan torsión en los elementos estructurales. Sin embargo, este tipo de diseño está presente en un gran número de edificios singulares que se localizan en zonas de media y alta sismicidad en España; como puede ser el palacio de exposiciones y congresos de Granada o el Proyecto de Centro Tecnológico de la Madera en Lucena, Córdoba.

Al ser un elemento de poca altura y con grandes muros de hormigón, a pesar de su singular geometría posee un periodo similar a los edificios regulares de la misma altura.

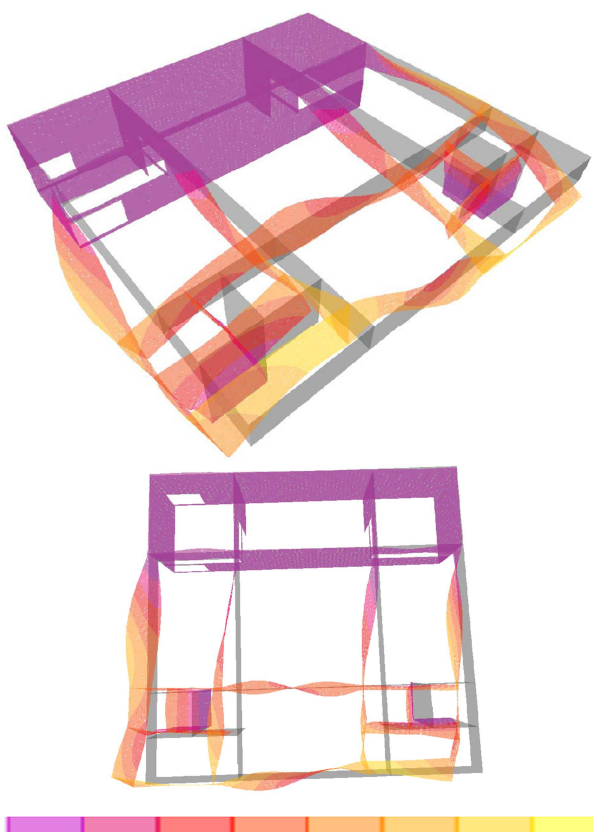


Figura 7: Modo fundamental de vibración de la Biblioteca Pública de Viana Do Castelo. Deformación normalizada por SAP2000 respecto a la situación sin carga (en gris).

4. Esfuerzos y deformaciones resultantes

Se realiza el análisis modal espectral pertinente con apoyo del programa SAP2000 y se resumen los resultados más representativos para cada tipo de edificio y movimiento analizados.

Los espectros se aplican en dos direcciones:

- D1. En la dirección que provocan mayor efecto se considera el 100% del espectro.
- D2. En la dirección perpendicular a la anterior se considera el 30% del espectro.

De esta forma tratamos de aproximarnos en la mayor medida posible a los criterios que define la normativa actual.

4.1. Edificio residencial en Lorca de largo periodo fundamental

En este edificio se decide elegir un pilar de planta baja para comparar resultados, por ser los elementos con mayor probabilidad de fallo debido a la concentración de esfuerzos.

4.1.1. Esfuerzos principales

Al aplicar los espectros definidos en las dos direcciones anteriores se obtiene la envolvente de los máximos esfuerzos resultantes con cada espectro. Las Figuras 8 ,9 y 10 muestran las envolventes de los esfuerzos resultantes en el caso más desfavorable.

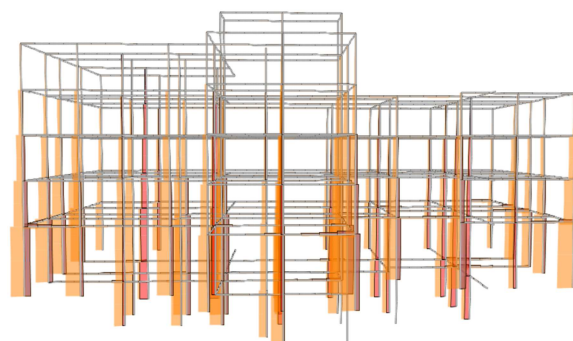


Figura 8: Envolvente del esfuerzo axial en la estructura.

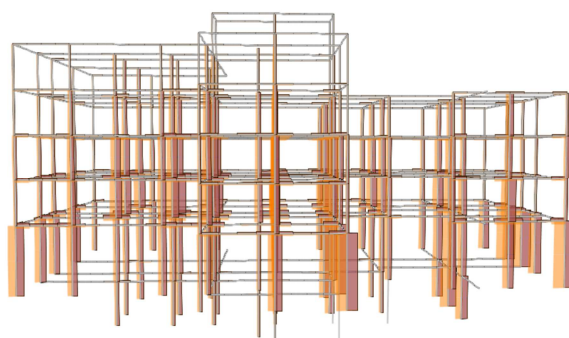


Figura 9: Envolvente de esfuerzo cortante de la estructura en la dirección D1.

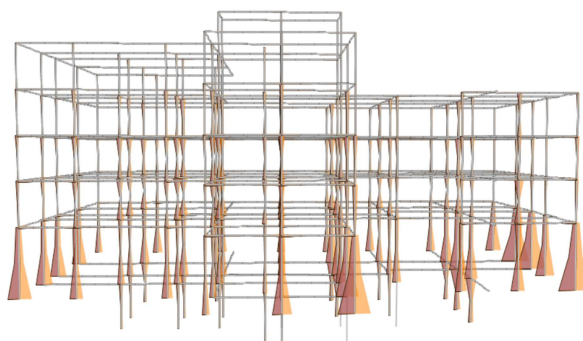


Figura 10: Envolvente de momento flector en la dirección D1.

4.1.2. Deformaciones

4.1.2.1. Espectro de periodo corto

El desplazamiento máximo obtenido como resultado de la combinación de modos se produce en las plantas altas y alcanza el valor de 105 mm (Fig. 11).

Por tanto el desplome se sitúa en valores en torno al 6 por mil, mayor al 5 por mil, definido por EN-1998 como aconsejable.

4.1.2.2. Espectro de periodo largo

El desplazamiento máximo alcanza un valor de 420 mm, muy superior a la resultante del espectro de periodo corto (Fig. 12). En este caso el edificio estaría mucho más cerca del colapso.

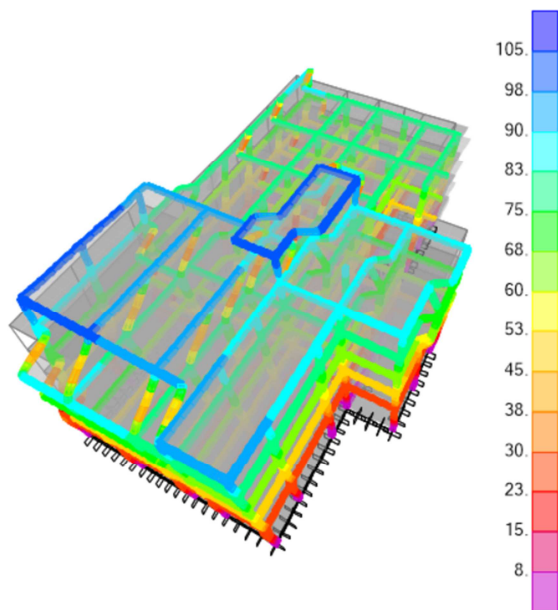


Figura 11: Deformada de la estructura (mm).

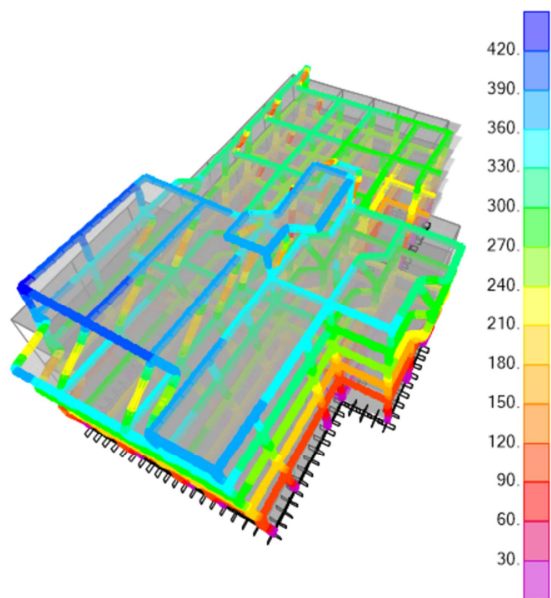


Figura 12: Deformada de la estructura (mm).

4.1.3. Comparativa

Considerando una masa total en combinación sísmica de 2060 toneladas se extraen los siguientes resultados.

4.1.3.1. Esfuerzos y deformaciones globales

Con el objetivo de evaluar la diferencia en la respuesta de la estructura, debido tanto a la forma como a la amplitud del espectro, se adjuntan las siguientes tablas de datos extraídos del análisis modal espectral realizado (Tablas 1 y 2):

4.1.3.2. Esfuerzos y deformaciones locales

Se analizan los esfuerzos y deformaciones del soporte señalado en la Figura 13. En concreto se dan los valores máximos, que ocurren en la planta baja.

Tabla 1: Desplazamientos y cortantes basales máximos para un T natural de la estructura de 1,22 s. Dirección principal del espectro: D1

	<i>Espectro periodo corto</i>	<i>Espectro periodo largo</i>
Cortante basal dirección D1 (kN)	3090	11290
Cortante basal dirección D2 (kN)	1020	4045
Desplazamiento máximo (mm)	105	420
Aceleración aplicada (/g)	0.19	0.92

Tabla 2: Esfuerzos principales para el mismo soporte de la estructura

	<i>Espectro periodo corto</i>	<i>Espectro periodo largo</i>
Axil máximo (kN)	325	755
Cortante máximo en D1 (kN)	100	350
Momento flector máximo en D1 (kN)	350	1285

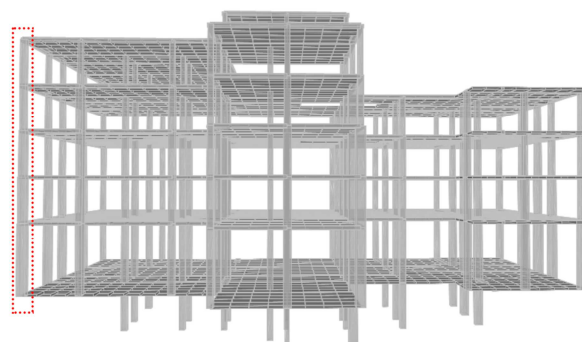


Figura 13: Soporte elegido para la comparación

4.2. Biblioteca pública V. Do Castelo de corto período fundamental

En este caso se analizan los esfuerzos resultantes en el punto más conflictivo de la estructura, los muros en L, ya que el sismo transmite al edificio una fuerza principalmente de cortante, y estos son los elementos menos redundantes de la estructura.

4.2.1. Esfuerzos principales

Se obtienen los resultados que se muestran en las Figura 14, (se representan de forma adimensional las envolventes de esfuerzos referidas al mayor de los valores de cada tipo para ambos espectros):

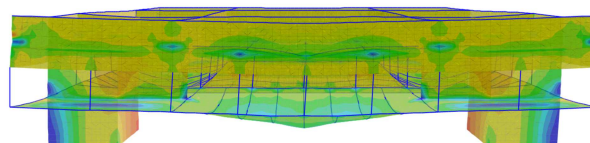


Figura 14: Tensiones S22 sobre la estructura deformada por el sismo (adimensional).

4.2.2. Deformaciones

Se obtienen los siguientes resultados.

4.2.2.1. Espectro de periodo corto

El desplazamiento lateral es muy bajo en cualquier caso, unos 5 mm, debido a la elevada rigidez de la estructura (Fig. 15).

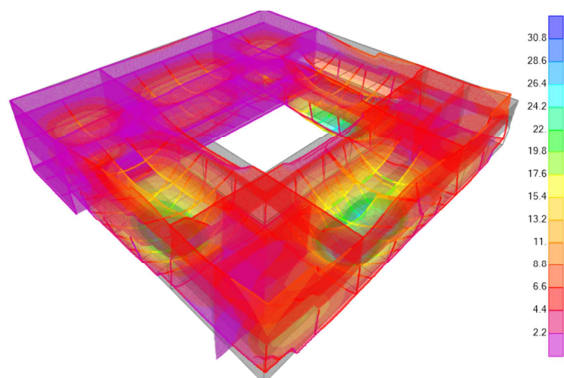


Figura 15: Deformada de la estructura (valores en mm).

4.2.2.2. Espectro de periodo largo

De nuevo, el desplazamiento es muy pequeño: unos 5mm (Fig. 16).

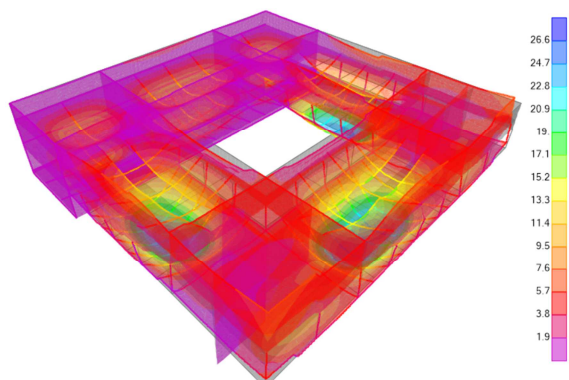


Figura 16: Deformada de la estructura (valores en mm).

4.2.3. Comparativa

Considerando una masa total en combinación sísmica de 5360 toneladas se extraen los siguientes resultados:

4.2.3.1. Esfuerzos y deformaciones globales

Con el objetivo de evaluar la diferencia en la respuesta de la estructura, debido tanto a la forma como a la amplitud del espectro, se adjuntan las siguientes tablas de datos extraídos del análisis modal espectral realizado (Tablas 3 y 4):

4.2.3.2. Esfuerzos y deformaciones locales

Se analizan los esfuerzos y deformaciones locales en los elementos más solicitados: los muros en L.

Tabla 3: Desplazamientos de la estructura de 1,22 s. Dirección principal del espectro: D1

	Espectro periodo corto	Espectro periodo largo
Cortante basal dirección X (kN)	10015	6470
Cortante basal dirección Y (kN)	5040	3870
Deform. Máxima (mm)	5	5
Aceleración aplicada (/g)	0.61	0.42

Tabla 4: Esfuerzos principales para un muro en L de la estructura

	Espectro periodo corto	Espectro periodo largo
Axil máximo (kN)	3735	2625
Cortante máximo en D1 (kN)	4000	2375

5. Conclusiones

De los resultados obtenidos, en términos de esfuerzos y respuesta de las estructuras, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

5.1. Relevancia de la forma espectral

Se puede concluir que una buena caracterización del espectro de respuesta del movimiento sísmico tiene una altísima repercusión en el diseño antisísmico de edificios. El hecho de utilizar en los cálculos de la estructura espectros de diseño menores que los de los movimientos que puedan producirse (terremotos reales) puede llevar a importantes daños materiales y sobre todo a víctimas humanas.

Conocer con mayor precisión las frecuencias o contenido espectral de los movimientos que pueden esperarse en una cierta localidad es indispensable para mejorar las prácticas constructivas de la zona y proteger los edificios ya construidos.

En los casos analizados, en un mismo edificio puede ser recomendable elevar o disminuir la rigidez/flexibilidad de una estructura en función de la forma espectral del posible evento sísmico concreto que se vaya a dar en el lugar.

Además, como se deriva de los valores de esfuerzos obtenidos en el edificio residencial de Lorca, de largo periodo, el hecho de que el sismo tuviese un periodo espectral relativamente corto en relación al del edificio, debido a su cercanía a la falla que originó el terremoto, contribuye en gran medida a que el edificio resista el evento al que se ve sometido.

5.2. Diseño estructural sismorresistente

Para conseguir un buen diseño estructural sismorresistente se ha de buscar:

- La máxima simetría posible tanto en planta como en alzado. Recurriendo, si es necesario, a la colocación de juntas de dilatación entre cuerpos regulares independientes.

- La mínima masa posible, para así reducir las fuerzas que provoca el sismo en la estructuras.
- La rigidez que confiera al edificio un periodo lo más alejado posible del periodo predominante del movimiento sísmico.
- Asimismo, evitar plantas con diferente rigidez en el mismo edificio.
- Proyectar estructuras dúctiles, para que la energía se disipe por medio de deformaciones plásticas remanentes, sin llegar al colapso.
- Evitar puntos débiles como nudos con rotura frágil, especialmente la rotura por cortante en elementos de hormigón armado.
- Procurar la redundancia de elementos primarios, cuyo fallo conduciría al colapso global de la estructura, como ocurriría en la biblioteca de Viana Do Castelo en el caso de fallar los muros en L.

5.3. Desarrollo de la normativa

La normativa vigente en el momento de construcción del edificio residencial en Lorca (PDS-1) evidencia importantes carencias a la hora de caracterizar el terremoto de diseño. Para calcular las fuerzas aplicadas no se considera el espectro real del (único) terremoto de referencia para el proyecto, sino únicamente su posible intensidad en la escala internacional macrosísmica (M.S.K.), y un factor de respuesta β dependiente del periodo de oscilación natural de la edificación considerada. La relación entre ambos sería la siguiente, Ec. (1):

$$\beta = B / (2T) \geq 0.5 \quad (1)$$

dónde:

- T = periodo fundamental estimado de la estructura
- B = amortiguamiento característico del edificio

Análogamente, la norma NCSE-02 sólo considera la posible alteración en la forma de los espectros de respuesta dentro del territorio español para el terremoto de referencia a través de un factor K (de carácter geográfico) y del coeficiente del suelo C (de carácter

geotécnico), con reducida capacidad en la precisión de los diferentes espectros esperables.

Además, cabría añadir como recomendación para la revisión de la normativa sismorresistente vigente que se haga explícito que, en caso de no incluir en el modelado los elementos secundarios en términos de rigidez, se considere para la rigidez inicial un valor apreciablemente mayor (entorno a un 50 %) que la calculada por los programas comerciales.

Las normativas que se están desarrollando en este momento en Europa, condicionan los esfuerzos resultantes a la forma del espectro de respuesta del movimiento sísmico, mediante un análisis modal espectral similar al realizado en este trabajo. Además, incluyen un nuevo concepto: el proyecto basado en prestaciones, cuyo objetivo es producir estructuras con un comportamiento sísmico predecible, ajustado a cada tipo de movimiento esperable (corto o largo período) en función de la probabilidad de alcanzar cada posible intensidad (Benavent 2017).

Este proyecto permite que la respuesta del edificio ante cada posible movimiento se encuentre en uno de los estados definidos dentro de un abanico de respuestas estándar preestablecidas: 1) "operacional", 2) "es posible la ocupación inmediata", 3) "se producen daños controlados", 4) "se asegura la protección de la vida", 5) "se mantiene la estabilidad estructural", etc.

El estado permitido para el edificio depende de su utilidad e importancia. Por ejemplo, un hospital debe mantenerse "operacional", mientras que una vivienda convencional debe "asegurar la protección de la vida".

En este trabajo hemos comprobado que los diferentes movimientos sísmicos que pueden esperarse en un cierto emplazamiento condicionan tanto la forma como la amplitud de los espectros de respuesta, y ello, a su vez tiene influencia decisiva en la respuesta de edificios dependiendo de sus cualidades sísmicas. Estas deberán adaptarse tanto a la intensidad del movimiento como a su contenido espectral.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Proyecto MERISUR, Programa Estatal Español de I+D+I Orientada a los Retos de la Sociedad, Ministerio de Economía (ref. CGL2013-40492-R).

Referencias

- BENAVENT CLIMENT, A., 2017. Estrategias convencionales y avanzadas de proyecto sismorresistente, Conferencia en el Máster de Estructuras de la Edificación, Ciclo de conferencias en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid.
- BENITO OTERINO, B., RIVAS MEDINA, A., GASPAR-ESCRIBANO, J.M. and MURPHY, P., 2012. El terremoto de Lorca (2011) en el contexto de la peligrosidad y el riesgo sísmico en Murcia. *Física de la Tierra*, **24**, pp. 255-287.
- CENTER FOR ENGINEERING STRONG MOTION DATA, 216. Northern Norcia Italy Earthquake Of 30 Oct 2016. Available: https://www.strongmotioncenter.org/cgi-bin/CESMD/Multiplesearch1_DM2.pl?event_name=&magmin=&magmax=&byear=&eyear=&country=Any&state=Any&stn_id=Avezzano&type=Any&Material=Any&Height=&accmin=&accmax=&hdistmin=&hdistmax [4/25, 2017].
- Clough, R. W. and PENZIEN, J., 2003. Dynamics Of Structures, Computers & Structures, Inc., Third Edition. 1995 University Ave., Berkeley, CA 94704, USA.
- NAVAS SÁNCHEZ, L., 2016 Biblioteca municipal: Viana do Castelo (Portugal), Álvaro Siza Vieira : [Cálculo de la estructura en zona sísmica], Master Thesis, Superior Technical School of Architecture, Polytechnic University of Madrid. Available: <http://oa.upm.es/44505/>.

- NCSE-94, 1994, Norma de Construcción Sismorresistente: Parte General y Edificación, Real Decreto 2543/1994, 29 de Diciembre.
- NCSE-02, 2002, Norma de Construcción Sismorresistente: Parte General y Edificación, Real Decreto 997/2002, 27 de Septiembre.
- P.D.S.-1, 1974, Norma Sismorresistente, Real Decreto 3200/1974, 30 de Agosto.
- WILSON, E.L., 2002. Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures, A Physical Approach With Emphasis on Earthquake Engineering, Third Edition, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA, ISBN 0-923907-00-9.

EPOS (EUROPEAN PLATE OBSERVATION SYSTEM)

J. Fernández^{a,*}, J. Gallart^b, R. Carbonell^b, J. Díaz^b, A. Villaseñor^b, A. Azor^c, F.J. González-Matesanz^d, A. Geyer^b, J.J. Curto^e, M. Mattesini^{f,a}, L.R. Rodríguez-Fernández^g, J.L. Fernández-Turiel^b

^a Instituto de Geociencias, CSIC-UCM. Plaza de Ciencias, 3. 28040-Madrid. jft@mat.ucm.es; jose.fernandez@csic.es

^b Institut de Ciències de la Terra Jaume Almera, CSIC. C/ Lluís Solé Sabaris s/n, 08028-Barcelona. jgallart@ictja.csic.es; ramon.carbonell@csic.es; jdiaz@ictja.csic.es; antonio.villasenor@csic.es; ageyer@ictja.csic.es; jlfernandez@ija.csic.es

^c Facultad de Ciencias, Av. de la Fuente Nueva s/n, 18071-Granada. azor@ugr.es.

^d Instituto Geográfico Nacional, C/General Ibáñez Ibero, 3. 28003-Madrid. fjgmatesanz@fomento.es.

^e Observatori de l'Ebre, (OE) CSIC - Universitat Ramon Llull, C/ Horta Alta, 38. 43520 Roquetes, Tarragona. jjcurto@obsebre.es.

^f Dpto. de Física de la Tierra, Fac. de Ciencias Físicas. Plaza de Ciencias, 1, 28040-Madrid. mmattesini@ucm.es.

^g Instituto Geológico y Minero de España, C/ Ríos Rosas, 23, 28003-Madrid. lr.rodriguez@igme.es.

Abstract:

EPOS (European Plate Observation System) (<https://www.epos-ip.org/>) is now established as the only European multidisciplinary and global research infrastructure in Earth Sciences. It integrates several hundred national observatories for the observation and measurement of the internal and dynamic structure of the planet, and in particular in Europe, distributed in 25 European countries, including Spain. The EPOS project, included in the 2008 ESFRI Roadmap, has been recognized by ESFRI in 2016 as a priority project for its implementation, because of its strategic relevance in the European Research Area.

Key words: Solid Earth, Geophysics, Geodesy, Geology, Data, Models, Services, Remote Sensing

Resumen:

EPOS (European Plate Observation System) (<https://www.epos-ip.org/>) se constituye actualmente como la única Infraestructura europea de Investigación multidisciplinar y global en Ciencias de la Tierra. Integra varios cientos de observatorios nacionales para la observación y medición de la estructura interna y dinámica del planeta, y en particular en Europa, distribuidos en 25 países de Europa, entre ellos España. El proyecto EPOS, incluido en la Hoja de Ruta ESFRI de 2008, ha sido reconocido por ESFRI en 2016 como proyecto prioritario para su implementación, por su relevancia estratégica en el ERA (European Research Area).

Palabras clave: Tierra sólida, Geofísica, Geodesia, Geología, Datos, Modelos, Servicios, Teledetección

1. Introducción

El Foro de Estrategia Europea de Infraestructuras de Investigación (ESFRI) (<http://www.esfri.eu/>) identifica las Infraestructuras de Investigación (RIS por nombre en inglés, Research Infrastructures) que pueden resolver las necesidades paneuropeas a largo plazo de las comunidades europeas de investigación en todas las áreas científicas. La publicación, desde el año 2006, de las hojas de ruta de ESFRI actualizados periódicamente ofrece al Consejo de la Unión Europea una visión coherente y estratégica para garantizar que Europa tenga excelentes RI, accesibles a todos sus investigadores para explotar plenamente su potencial para el progreso científico y la innovación. Estas RIS desempeñan un papel cada vez más importante en el avance del conocimiento y la tecnología, siendo un instrumento clave para reunir la gran diversidad de partes interesadas en obtener soluciones a los problemas que se enfrenta la sociedad hoy en día. Por otra parte, las RIS ayudan a crear un nuevo entorno de

investigación en el que todos los investigadores, trabajando tanto en el desarrollo de iniciativas científicas nacionales o multinacionales, tienen acceso compartido a las instalaciones científicas, independientemente de su tipo y ubicación. Las RIS están, por tanto, en el centro del triángulo del conocimiento de la investigación, la educación y la innovación, la producción de conocimiento mediante la investigación, la difusión a través de la educación, y su aplicación a través de la innovación.

EPOS (European Plate Observation System) (<https://www.epos-ip.org/>) es actualmente la única Infraestructura europea de Investigación multidisciplinar y global en Ciencias de la Tierra. Integra varios cientos de observatorios nacionales para la observación y medición de la estructura interna y dinámica del planeta, y en particular en Europa, distribuidos en 25 países de Europa, entre ellos España. El proyecto EPOS, incluido en la Hoja de Ruta ESFRI de 2008, ha sido reconocido por ESFRI en 2016 como proyecto prioritario para su

* Corresponding Author: José Fernández, jft@mat.ucm.es

implementación, por su relevancia estratégica en el ERA (European Research Area). Tras la participación de EPOS en la Convocatoria de apoyo a la implementación y operación de proyectos ESFRI, Infradev-3-2015, se obtuvieron los fondos para la fase de implementación actual (EPOS IP) que concluirá en octubre de 2019.

EPOS, es por tanto un plan a largo plazo para facilitar el uso integrado de datos, productos de datos e instalaciones de infraestructuras de investigación distribuidos, para realizar investigación en Ciencias de la Tierra sólida en Europa. EPOS reunirá a científicos de Ciencias de la Tierra, infraestructuras nacionales de investigación, expertos TIC (Tecnología de la Información y las Comunicaciones), responsables de la toma de decisiones y a la población como usuario último, para desarrollar nuevos conceptos y herramientas que permitan dar respuestas precisas, duraderas y sostenibles a las preguntas de la sociedad en temas como los peligros geológicos y los fenómenos geodinámicos (incluyendo geo-recursos) relevantes para el medio ambiente y el bienestar humano. EPOS, mediante la integración de las infraestructuras nacionales y transnacionales de investigación existentes, aumentará el acceso y uso de los datos multidisciplinares registrados por las redes y técnicas de observación de la Tierra sólida, los adquiridos en experimentos de laboratorio y/o producidos por simulaciones computacionales. El establecimiento de EPOS fomentará la interoperabilidad a nivel europeo y mundial en las Ciencias de la Tierra y servicios a una amplia comunidad de usuarios. Como resultado, miles de investigadores en Ciencias de la Tierra se beneficiarán de los servicios prestados por EPOS fomentando grandes avances en la comprensión de los procesos que ocurren en la dinámica terrestre.

Actualmente estamos próximos a la constitución del Consorcio Europeo de Investigación de la Infraestructura de observación europea de la dinámica del planeta, EPOS ERIC. Desde los comienzos de esta iniciativa europea se ha estado trabajando a nivel español para establecer una plataforma multi-instrumental y pluridisciplinar que aglutine las infraestructuras existentes y actúe de nodo nacional en EPOS. Entre las actuaciones desarrolladas cabe mencionar el proyecto CONSOLIDER 'TOPO-IBERIA'. Este proyecto nace de la voluntad de establecer una plataforma común de trabajo que integre todas las capacidades, bases de datos, software, infraestructuras y equipamientos de los distintos grupos españoles. TOPO-IBERIA cuenta con la participación de 150 investigadores sénior de 10 grupos españoles pertenecientes a 7 universidades (UO; UB; UCM; UAB; UCA; UJ; UGR) y 2 OPIs (CSIC e IGME) y el Real Observatorio de la Armada (ROA).

Los 10 grupos participantes en TOPO-IBERIA han expresado desde el inicio (Convenio de Colaboración) su voluntad de seguir coordinados para el uso y mantenimiento conjunto tanto de la instrumentación como de las BBDD de IberArray una vez finalizado el proyecto. En este sentido destacar que actualmente se está acabando de perfilar un convenio de colaboración para la creación del "Consorcio IberArray" que se prevé firmar a lo largo de 2016. El consorcio IberArray, podría nuclearse como el "nodo" español de EPOS ya que distintas instituciones han mostrado su interés en

participar en el consorcio con su equipamiento y bases de datos. De hecho, algunas de ellas están ya operativas en IberArray, como es el caso de las redes sísmicas permanentes, nacionales (IGN) y autonómicas (Andalucía, Catalunya), redes permanentes de GPS, etc.

Por otra parte, hay que destacar que en la fase preparatoria de EPOS, España ha sido el país con mayor número de instituciones que han manifestado explícitamente su interés en formar parte de esta infraestructura. En concreto, unas 25 Instituciones españolas (incluyendo las 10 de IberArray) han explicitado sus equipamientos (instrumentación, personal, costes, etc.), según puede comprobarse en la tabla adjunta y en la web de EPOS (epos-eu.org/ride). El coste total declarado de estas Infraestructuras españolas de investigación que formarían parte de EPOS es muy remarcable, ya que supera los 45 M€.

Por tanto, puede concluirse que España cuenta por primera vez con: (a) Una plataforma multi-instrumental y pluridisciplinar de observación de la Tierra para el estudio del subsuelo y de su impacto ambiental (IberArray). Esta plataforma podría nuclear el "nodo" español de EPOS, ampliando la participación a todas las instituciones españolas que han mostrado su interés por "EPOS"; (b) Una red integrada de centros/grupos bajo el paraguas de una iniciativa europea; (c) Una coordinación a nivel internacional con otros programas similares (p.e., EarthScope); (d) Una activa participación en la fase preparatoria de la gran infraestructura europea EPOS-ESFRI, 25 Instituciones españolas han expresado su interés en las fases subsiguientes, de construcción y operación.

Todo esto ha justificado plenamente la creación de la red Temática EPOS España que apoye el desarrollo de EPOS a nivel europeo, potenciando el papel e importancia de España y sus grupos de investigadores, en el desarrollo e implementación de esta infraestructura, permitiendo, a su vez, configurar un Consorcio Español en Ciencias de la Tierra Sólida en el marco del cual se desarrolle un trabajo científico técnico conjunto y pluridisciplinar de alto nivel. Las infraestructuras de investigación (RIS) que EPOS tiene como objetivo integrar incluyen, entre otros:

- Sistemas geofísicos de observación distribuidos regionalmente (p.e., sísmológicos y redes geodésicas).
- Observatorios locales (p.e., geomagnéticos, y observatorios volcanológicos).
- Laboratorios experimentales y analíticos.
- Datos de satélite integrado y la información geológica.

Se ha concedido recientemente una ayuda, en la convocatoria de 2016, para la creación de la Red de Excelencia "EPOS España", coordinada por José Fernández Torres (IGEO, CSIC-UCM) a través del CSIC, (que es el representante nacional actualmente en EPOS, siendo Josep Gallart, ICTJA el coordinador español). La creación de la red EPOS España permitirá apoyar EPOS a nivel europeo, potenciando el papel e importancia de España y sus grupos de investigadores en el desarrollo e implementación de esta

infraestructura. Permitirá, a su vez, configurar un Consorcio Español en Ciencias de la Tierra en el marco del cual se desarrolle un trabajo científico técnico conjunto y pluridisciplinar de alto nivel.

Para ver la diversidad de las RIS que participan en el plan de integración de EPOS se puede visitar la base de datos de las infraestructuras de investigación para EPOS (RIDE, <http://epos-eu.org/ride/>), donde actualmente están unos 250, con más de un petabyte de datos almacenados, más de 70 laboratorios y miles de instrumentos en sismica, redes GNSS, y observatorios geomagnéticos y volcánicos. Estas RIS institucionales o nacionales existentes en Ciencias de la Tierra sólida en Europa generan datos e información, siendo responsables de la operación de la instrumentación en cada país. Las infraestructuras de investigación constituyen la capa básica del plan de integración de EPOS, que se estructura de la siguiente manera (Fig. 1):

Integrated Core Services (ICS) (Núcleo de Servicios Integrados): proporcionan acceso a los datos multidisciplinares, productos de datos, y datos sintéticos a partir de herramientas de simulación, proceso y visualización. No se trata sólo de acceso a datos: EPOS significa integrar, analizar, comparar, interpretar y presentar datos e información sobre la Tierra sólida. Este es el lugar donde se produce la integración.

Thematic Core Services (TCS) (Núcleo de Servicios Temáticos): son infraestructuras que proporcionan servicios de datos a comunidades específicas (que también pueden ser organizaciones internacionales, tales como ORFEUS en sismología).

National Research Infrastructures (NRI): Las Infraestructuras e Instalaciones Nacionales de Investigación proporcionan servicios a nivel nacional y enviar datos a las infraestructuras europeas de datos temáticas.

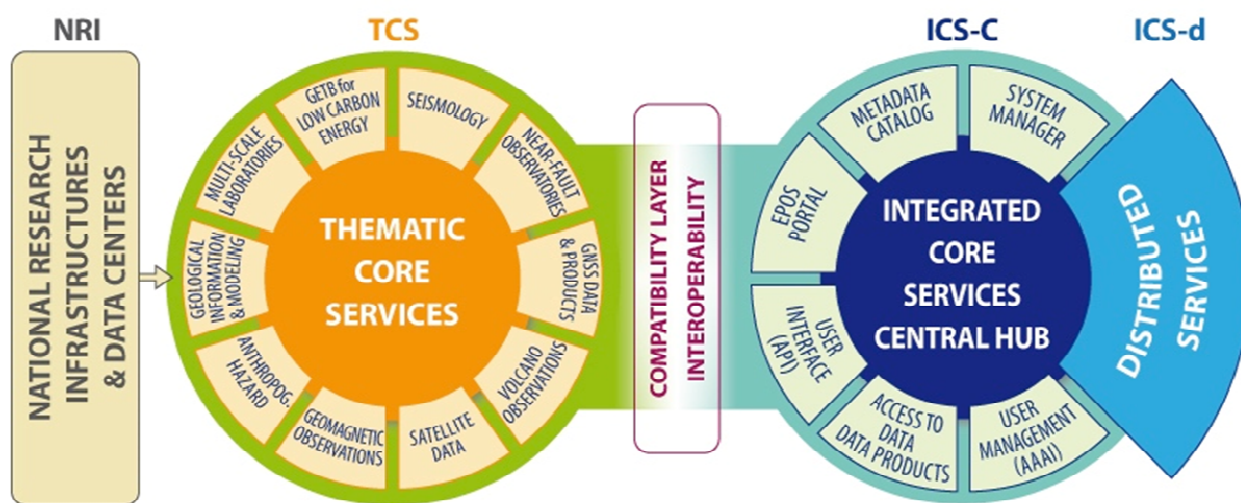


Figura 1: Arquitectura de la infraestructura EPOS.

En EPOS se han determinado 10 servicios temáticos principales, asociados a Work Packages (WP8-WP17). Al configurar la red temática EPOS España se ha considerado como la mejor opción el respetar esta organización, definiéndose los siguientes grupos y coordinadores:

- EPOS España Sismología (WP8), Jordi Díaz Cusí, Antonio Villaseñor (CSIC, ICTJA).
- EPOS España Observatorios Próximos a fallas (WP9), Antonio Azor Pérez (Univ. Granada).
- EPOS España GNSS (WP10), Francisco J. González Matesanz (IGN).
- EPOS España Volcanología (WP11), Adelina Geyer Traver (CSIC, ICTJA).
- EPOS España Espacio (WP12), José Fernández Torres (CSIC, IGEO).
- EPOS España Observaciones Magnéticas (WP13), Juan José Curto Subirats (OE).
- EPOS España Sismicidad Inducida (WP14), Maurizio Mattesini (UCM, IGEO).

- EPOS España Información y Modelado Geológicos (WP15), Luis Roberto Rodríguez Fernández (IGME).
- EPOS España Laboratorios Multiescala (WP16), José Luis Fernandez Turiel (CSIC, ICTJA).
- EPOS España GETB for low carbon energy (WP17) Ramon Carbonell (CSIC, ICTJA).

Veamos los objetivos de cada grupo.

2. EPOS España Sismología

El grupo EPOS Sismología España reúne los centros responsables de las diversas redes sísmicas permanentes que operan en nuestro país (IGN, ICGC, IAG-UG, ROA-UCM), así como de los centros que gestionan redes de estaciones sísmicas portátiles (ICTJA-CSIC, IAG-UG, UO, UCM, IGN, ICGC). El grupo participa activamente en el WG8 'Seismology' del proyecto EPOS-IP, siendo una de las entidades que lo forman (CSIC) la responsable dentro de EPOS de la coordinación de las actividades de los parques de estaciones sísmicas portátiles (Mobile Seismic Pools). Parte de los integrantes del grupo participan

actualmente en la Red de Excelencia 2014 “Red Topolberia-Iberarray: Estudios integrados de Geodinámica y estructura de la placa Ibérica” (CGL2014-54582-REDC), vigente en el periodo 2014-2016 y que a su vez tuvo su origen en el proyecto Topolberia, financiado por la convocatoria 2010 del programa Consolider-Ingenio. En lo referente a las redes permanentes, el principal objetivo que se plantea es la mejora en el intercambio de información en la adquisición, gestión y disponibilidad de los datos obtenidos por las redes sísmicas. Esta labor será de gran importancia para la integración de estos datos en el marco del proyecto EPOS-IP. Respecto a la gestión de las redes sísmicas portátiles, el principal objetivo es establecer un buen mecanismo de coordinación entre los diversos centros, especialmente necesario para dar a conocer la instrumentación disponible y para definir formatos comunes para la distribución de los datos obtenidos y de sus metadatos. Con la constitución de grupo EPOS España Sismología se espera establecer vínculos sólidos de cooperación entre toda la comunidad sismológica del país. La creación de un grupo fuerte y capaz de dar respuesta a los diversos aspectos de la investigación sísmica resulta imprescindible para poder mantener un buen nivel científico internacional.

3. EPOS España Observatorios Próximos a Fallas

Los Observatorios próximos a Fallas (NFO) son infraestructuras de investigación multidisciplinares avanzadas basadas en redes integradas de sensores multi-paramétricas que realizan un seguimiento continuo de los procesos físicos y químicos que rigen las fallas activas y la génesis de los terremotos. Estas redes complementan las redes sísmicas y geodésicas regionales con distribuciones de alta densidad de sensores sísmicos, geodésicos, geoquímicos y geofísicos ubicados a corta distancia (hasta 10-20 km) de las fallas activas donde se esperan grandes terremotos.

Los objetivos específicos son participar en el desarrollo y obtención de los objetivos del WP9 de EPOS IP (p.e., adquisición y almacenamiento de series de datos multidisciplinares disponibles, elaboración de normas para el almacenamiento de datos, definición de metadatos, etc...), así como coordinar a nivel nacional la actividad en este campo de científicos de los diferentes campos implicados, fomentar la realización de actividades científicas conjuntas a nivel nacional e internacional, estudiar las posibilidades de creación de NFO en España, su diseño, la instalación y la inclusión en EPOS

4. EPOS España GNSS

Las redes GNSS son unas de las herramientas más poderosas en la observación de los movimientos de la placa. Existe una gran heterogeneidad de redes de estaciones permanentes GNSS en España. Por un lado, existen redes GNSS tanto pertenecientes a las administraciones públicas como privadas, que ponen sus datos a disposición libre de los usuarios o no, que su principal objetivo es geodésico/científico o que simplemente su objetivo principal es proporcionar un servicio de correcciones en tiempo real. Además, estas

redes pueden tener un ámbito territorial autonómico, nacional o incluso ninguno de los dos anteriores. En principio, todas ellas podrían ser aprovechables para la investigación científica.

Actualmente ya existen organismos de coordinación tanto a nivel europeo, red de estaciones permanentes de EUREF, como a nivel español ‘Comisión Española del Sistema Geodésico de Referencia’. De las estaciones GNSS se pueden obtener distintos tipos de datos en función del intervalo de grabación, formato y periodo que abarca. Se considera que el dato útil y suficiente para la observación de la placa europea, que es el objetivo de EPOS, que se obtiene a partir de las estaciones GNSS es el fichero diario con intervalo de grabación de 30 segundos en el formato internacional de intercambio, RINEX. Se pretende colaborar con el resto de grupos para la correlación de los datos GNSS con el resto de observaciones a nivel nacional.

5. EPOS España Volcanología

El objetivo principal del WP11 “Volcano Observations” dentro del proyecto EPOS IP consiste en proporcionar, de manera sostenible y a largo plazo, el acceso a datos y productos que se recogen y existen actualmente en los Observatorios Volcanológicos Europeos (VO) y las denominadas Instituciones de Investigación Volcanológicas (Volcano Research Infrastructures, VRI), que incluyen tanto universidades como centros de investigación que desarrollan una actividad científica de relevancia dentro del ámbito de la volcanología. A nivel europeo, el grupo de trabajo “Volcano Observations” se construye gracias a las infraestructuras operadas por los VOs y VRIs, así como los conjuntos de datos y productos recopilados y desarrollados durante décadas, siendo el objetivo final dentro de EPOS IP, implementar unos servicios que proporcionen y faciliten tanto el acceso a dichos productos y datos como su interoperabilidad. Este es uno de los grupos de trabajo más multidisciplinar de EPOS IP ya que dentro de la larga lista de datos y productos con los que se cuenta se incluyen: (1) Datos y productos de sismología volcánica y GNSS, (2) Datos geológicos, volcanológicos y ambientales, (3) Datos y productos de satélites, (4) Datos y productos de análisis químicos, resultados experimentales y modelos numéricos. Esto conlleva que el WP11 tenga una estrecha relación con el WP8 (Seismology), WP10 (GNSS Data & Products), WP12 (Satellite Data), WP15 (Geological information and modeling) y WP16 (Multi-scale laboratories). Adicionalmente, el WP11 tiene como objetivo proporcionar acceso a productos y herramientas para la evaluación de la peligrosidad y riesgo volcánico, así como a herramientas tanto experimentales como numéricas enfocadas a la modelización de procesos volcánicos. Por último, se trabaja en el acceso transnacional a recursos e instalaciones para la realización de tareas de investigación básica o durante periodos de reactivación y/o crisis volcánica. A nivel español, los objetivos del grupo EPOS España Volcanología se enmarcan dentro de los descritos para EPOS-IP, habiendo una primera necesidad de identificar y recopilar los datos, productos e incluso servicios ya existentes que puedan ser posteriormente integrados en la infraestructura europea. Se pretende también identificar aquellos recursos e instalaciones que puedan proporcionar acceso transnacional a investigadores o

grupos de investigación tanto nacionales como europeos siguiendo la iniciativa de EPOS IP. Finalmente, se pretende coordinar la comunidad volcanológica en España para fomentar el intercambio de datos y productos, así como para la realización de actividades conjuntas a nivel nacional e internacional.

6. EPOS España Espacio

España, en el marco del WP12 de EPOS IP suministrará en abierto a la comunidad científica datos de deformación superficial terrestre determinados mediante interferometría radar de satélite y su combinación con otras técnicas como GNSS, y herramientas de modelado online para su interpretación. La participación de este grupo (en el que se incluyen organismos como CSIC, EEAD, UCM, UPM, Univ. Alicante, IGME, IGC, UPC, IGN, ICGC, CTTC) en la red temática EPOS España permitirá fortalecer las capacidades científico-técnicas de los grupos de investigación en estas técnicas punteras todo el país, que, de forma coordinada explotarán científica y técnicamente el servicio, facilitando sinergias y colaboraciones en el entorno EPOS que darán lugar a la generación de conocimientos de frontera y el desarrollo de tecnologías emergentes orientadas a la resolución de las necesidades presentes y futuras de nuestra sociedad. En el marco de la comunidad radar de satélite en España, además de la implementación del Servicio incluido en la solicitud de EPOS IP para el nodo nacional español, se ha iniciado la identificación y consolidación de la comunidad. Esto se está haciendo considerando que EPOS ESPACIO se centra en el estudio de deformaciones superficiales mediante el uso de Interferometría Radar de Satélite, complementando con óptico para desplazamientos horizontales y observación GNSS. Considerando lo reducida que es la comunidad de Gravimetría por Satélite a nivel nacional se ha considerado interesante incluirlos también desde el principio. Se han realizado diferentes reuniones de esta comunidad científico-técnica, donde se han definido los siguientes objetivos: (1) Colaborar en el desarrollo de esta infraestructura; (2) Usarla como marco de colaboración y de crecimiento conjunto; (3) Considerar la solicitud de proyectos de investigación a nivel nacional y europeo para el desarrollo e implementación de esta y otras infraestructuras; (4) Apoyar la creación de un espejo nacional de datos de la ESA suministrándole servicios de valor añadido a través de los servicios implementados en el nodo nacional de Espacio en EPOS IP; (5) Se pretende también colaborar con el resto de grupos, en particular con el WP10 para la fusión de datos GNSS e InSAR a nivel nacional.

7. EPOS España Observaciones Magnéticas

El seguimiento de campo geomagnético tiene una larga historia en toda Europa, aunque ha habido poca coordinación a nivel europeo. En EPOS IP, serán objetivos: consolidar la comunidad; modernizar los formatos de archivo y distribución de datos para los servicios existentes, tales como INTERMAGNET; y crear nuevos servicios de datos y modelos geomagnéticos y magnetotélúricos. Los objetivos específicos son: (1) Mejorar los servicios existentes que proporcionan datos geomagnéticos (Red internacional

de observatorios magnéticos en tiempo real, INTERMAGNET; Centros Mundiales de Datos de Geomagnetismo, WDC; Monitor Internacionales para efectos geomagnéticos de las auroras, IMAGEN) y servicios que proporcionan los índices geomagnéticos (ISGI-Servicio Internacional de Índices geomagnéticos). (2) Proporcionar a través de una interfaz web información completa de metadatos y servicios web relacionados con las bases de datos que se ofrecen. (3) Desarrollar y construir el acceso a datos y modelos magnetotélúricos (MT) que incluye funciones de transferencia (TFS) y series de tiempo (TS), los datos de los MT-arrays temporales portátiles en Europa, y los modelos de conductividad litosféricas derivados de datos TM. (4) Desarrollar puntos comunes de acceso web y bases de datos a los modelos globales y regionales de campo geomagnético interno y externo como el International Geomagnetic Reference Field, IGRF, el World Magnetic Model, WMM, el World Digital Magnetic Anomaly Map, WDMAM, etc., y modelos de conductividad eléctrica. (5) Establecimiento de enlaces entre los distintos Working Packages, WP, a nivel de servicios, productos y modelos. (6) Creación de un nuevo servicio de modelos geomagnéticos basados en datos históricos y arqueomagnéticos.

8. EPOS España Sismicidad Inducida

Es indudable la alarma social que causa la ocurrencia de los terremotos y si se trata de terremotos causados de forma no deliberada por el hombre (sismicidad inducida o artificial) es mucho mayor el impacto en la sociedad. En el caso de España existen casos bien documentados de terremotos artificiales o inducidos por presas (Almedra 1972; Tous 1999; Itoiz 2004), Inyección de gas (Cástor 2013), etc. Por tanto, se trata de un riesgo actual y que puede incrementarse en el futuro. Un proyecto como el que se propone permitirá disponer de una amplia base de datos que pueda ser consultada por investigadores y expertos en el futuro. Este grupo se propone los siguientes objetivos: (1) Asistencia y participación en las reuniones del WP14 de EPOS a nivel europeo, apoyando el desarrollo de esta infraestructura. (2) La elaboración de un catálogo de terremotos artificiales o inducidos en España por presas/embalses, inyección de gas o fluidos en la corteza, minas, etc. y que están bien documentados. (3) Recopilación de la documentación ya existente en forma de publicaciones en revistas del SCI, informes, tesis y tesis, etc. (4) Creación de una base de datos en la nube. En una primera fase esta base de datos estará abierta solo a los investigadores de EPOS. En una segunda fase se discutiría si se pone en abierto y si hay restricciones a los posibles usuarios. En una segunda fase, y en función de la financiación disponible, se podría recolectar datos de los casos estudiados. El tipo de observaciones sería: (a) sismogramas tanto analógicos como digitales; (b) volumen de agua embalsada, tasa de desembalse; (c) volumen de fluido inyectado; (d) sismicidad de la zona; (e) información geológica del emplazamiento; (f) Otros.

9. EPOS España Información y Modelado Geológicos

Los objetivos de este grupo son los siguientes: (1) Asistencia y participación en las reuniones del WP15 de EPOS a nivel europeo, apoyando el desarrollo e implementación de esta infraestructura. (2) Provisión de un acceso eficiente y fácil a los conjuntos de datos científicos del subsuelo obtenidos a partir de estudios de campo y observatorios científicos o por modelado geológico: (i) mapas geológicos en las diversas escalas y detalle; (ii) datos estratigráficos de sondeos y perforaciones profundas (ICDP/IODP) (iii) bases de datos e inventarios de riesgos geológicos (iv) modelos geológicos (3D y 4D 3D/4D), incluyendo modelos geológicos 3D estructurales, así como los modelos numéricos, los datos también incluyen datos nivel 0 (raw) validados, p. e., perfiles sísmicos. Todos estos datos son de alta calidad y de valor científico único ya que el proceso de modelado es costoso y lento. Para suministrar estos conjuntos de datos se ha ideado una plataforma de gestión de datos basado en modelos de datos común y estandarizada, protocolos y codificaciones, así como en un uso predominante de software libre y de código abierto (FOSS). La interoperabilidad de las aplicaciones por disciplina y dominio depende por tanto en gran medida de la adopción general de las tecnologías y estándar de aceptación (OGC, ISO...) procedentes de esfuerzos realizados en Infraestructura de Datos Espaciales relacionados (p.e., INSPIRE) o de redes ya existentes: OneGeologyEurope, EMODnet-geology o EGD1 (European Geological Data Infrastructure).

10. EPOS España Laboratorios Multiescala

Los objetivos específicos de este grupo coinciden con los de EPOS, desarrollándose a nivel nacional primero, para poder integrarse simultánea o posteriormente en la infraestructura europea, y son:

1. Recoger y armonizar los datos de laboratorio disponibles y emergentes sobre las propiedades y procesos que controlan el comportamiento del sistema de rocas a múltiples escalas para generar productos / servicios accesibles e interoperables.
2. Coordinar el desarrollo, integración y uso de los principales centros y redes de laboratorios en Ciencias de la Tierra sólida.
3. Proporcionar productos y servicios de apoyo a la investigación en Geo-recursos y Geoalmacenamiento, peligros geológicos y la evolución del sistema Tierra.

En el ámbito del paleomagnetismo, este paquete de trabajo se coordinará con la propuesta de la red Maglber que pretende continuar la labor ya iniciada en 2014 de generación de bases de datos paleomagnéticos en Iberia. La red Maglber está coordinada con las acciones ya iniciadas de EPOS-Europa-Laboratorios paleomagnéticos.

11. EPOS España GETB for low carbon energy

La energía es una de las temáticas más trascendentales dentro del marco de la investigación en Europa y son muchas las iniciativas dirigidas a incrementar la eficiencia y disminución de los efectos negativos de su producción. Así dentro del Horizonte 2020, uno de los compromisos de la UE es la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero un 20% por debajo de los niveles de 1990. Este compromiso es uno de los objetivos principales de la estrategia de crecimiento Europa 2020 y está siendo implementado a través de una legislación vinculante. La generación de energía tendrá que desarrollar un esfuerzo en I+D+i temáticas de: reducción de las emisiones (-54 a 68% en 2030 y -93 a -99% en 2050); en la captura y almacenamiento de CO₂; en energías renovables de superficie (eólica, mareomotriz y solar); en temas relacionados con gas de esquisto; la energía nuclear (e. g., gestión de residuos) y geotérmica. Todas estas tecnologías tienen en común que están intensamente relacionadas con el subsuelo (relativamente poco profundo) lo que se denomina capa crítica (subsuelo crítico). La zona del subsuelo con la que la sociedad tiene una interacción más intensa. El subsuelo poco profundo es de gran importancia en muchos campos, desde la ingeniería civil, estudios medioambientales, gestión de residuos, obtención de recursos naturales (agua, hidrocarburos, minerales, etc.). En un continente densamente poblado (EU) se requiere de un alto nivel de gestión del subsuelo crítico y una garantía de la seguridad del medio ambiente en todas las actividades y en particular con las relacionadas con la Energía. En la EU hay una serie de iniciativas (EERA es un ejemplo) involucradas en estos temas. Además los países en EU han desarrollado instalaciones e infraestructuras (lo que aquí en EPOS se denomina "Geo-Energy Test Beds") que desarrollan trabajos de investigación, experimentación sobre los procesos (bajo la superficie) que afectan a la sostenibilidad del medio ambiente, incluyendo: el flujo, contención, fuga de fluidos, crecimiento de la fractura hidráulica, hundimientos, sismicidad inducida, las emisiones y tensiones residuales entre otros. En resumen, los GETB son infraestructuras avanzadas/singulares (de investigación) que permiten la comprensión de procesos que hacen posible la sostenibilidad medio ambiental en todos aquellos procesos que impliquen el uso del subsuelo (desde actividades de extracción a actividades de almacenamiento) y son de gran interés para el público en general y para los entes reguladores. Los laboratorios o bancos de pruebas Geo-Energy (Geo Energy Test Beds) son la base de la concepción de los sistemas de gestión de la subsuperficie; y sobre los que se apoya y desarrolla la regulación. Un objetivo clave de EPOS en este paquete de trabajo es el desarrollar sistemas informáticos integrados para facilitar el acceso a la infraestructura de datos generados por estas instalaciones y facilitar el acceso y experimentación en las mismas. Entre otros objetivos está el permitir la publicación en línea de los datos de seguimiento, fomentar la transparencia y mejorar la aceptación del público y la confianza. A largo plazo GETB ayudará el desarrollo de un nuevo modelo de sistema de energía en Europa asegurar: (1) una mayor seguridad e independencia energética, reducir la vulnerabilidad a las

fluctuaciones del precio de la energía externas; y (2) fomentar el desarrollo de soluciones energéticas europeas. Esta infraestructura integrada trabajará junto con otras infraestructuras de EPOS para crear una plataforma de investigación multidisciplinar eficiente e integral de las ciencias de la Tierra en Europa. Los objetivos específicos son:

- Facilitar el uso integrado de datos, modelos y servicios que hasta ahora han sido operados por separado, en diferentes ámbitos de la geoenergético, para llegar a una comprensión común de los procesos y los recursos energéticos en el subsuelo profundo.
- Proporcionar acceso a la observación, modelado e instalaciones experimentales para mejorar nuestra comprensión fundamental de los entornos geológicos profundos y procesos que regulan la producción y almacenamiento de hidrocarburos a través del tiempo geológico.
- Integrar los datos, los modelos y las instalaciones de GETB dedicado con sistemas geofísicos regionales de observación (redes sismológicas y geodésicas), observatorios locales (incluyendo geomagnéticas y volcán observatorios), laboratorios experimentales y los datos satelitales integradas para obtener el máximo rendimiento de las instalaciones de control existentes no necesariamente dedicado al desarrollo de la energía.
- Promover un enfoque integrado para la planificación de la próxima generación de instalaciones de investigación para geoenergías.
- A través de sistemas informáticos integrados y la entrega a Geo Energía bancos de pruebas, permitir la publicación en línea de los datos de seguimiento para fomentar la transparencia y mejorar la aceptación del público y la confianza.
- En el largo plazo, contribuir a lograr un nuevo sistema de energía en Europa asegurar: (1) una mayor seguridad del suministro de energía, una mayor independencia, y reducir la vulnerabilidad a las fluctuaciones del precio de la energía externas; y (2) fuentes de producción propia de energía que contribuyan a la balanza de pagos, el empleo y los ingresos fiscales.
- Apoyar el diseño de la gestión de los sistemas sostenibles para el subsuelo y desarrollar la regulación para la identificación y explotación de los recursos energéticos geo-subterráneos.

En particular España ha desarrollado iniciativas e infraestructuras muy relevantes centradas en esta temática, por una parte, está la investigación relacionada con la energía y gestión de residuos llevada a cabo de la mano de ENRESA en colaboración con Instituciones de investigación científica (CIEMAT, CSIC, etc.) y Universidades. También hay que subrayar el trabajo desarrollado dentro del proyectos financiados por la UE como el proyecto COMPOSTILLA (<http://www.compostillaproject.eu/>; [\[/projects/compostilla.html\]\(#\)\), uno de los programas de investigación punteros en la captura de CO₂. Este proyecto junto con financiación nacional a través de CIUDEN \(Fundación Ciudad de la Energía\) facilitó el desarrollo de instalaciones singulares, laboratorios únicos cuya explotación es de gran valor para los objetivos generales de este “working package de EPOS”. Esta red haría posible un primer paso facilitando las tareas de “networking” necesarias para crear un núcleo nacional de instalaciones GETB con un peso específico suficiente para potenciar estas infraestructuras, facilitando datos y acceso a la comunidad científica.](https://sequestration.mit.edu/tools</p></div><div data-bbox=)

12. La Red EPOS España

La creación, y financiación de la red temática EPOS España será una herramienta fundamental para:

1. Resolver un aspecto de gran importancia. Los grupos asociados a los WP 8, 11, 12, 13 y 16, al tener representación en el proyecto EPOS IP, disponen de financiación, asociada al desarrollo e implementación de tareas y servicios, mientras los otros no disponen de financiación que permita desplegar la representación española en el desarrollo e implementación de la infraestructura EPOS con relevancia. La constitución de esta red temática permite ayudar a solventar este problema y que España pueda tener un peso en el desarrollo e implementación de esta infraestructura acorde con su importancia científica y económica en Europa.
2. Aumentar las actividades conjuntas de I+D y de difusión a nivel nacional e internacional, aprovechando la colaboración entre los grupos participantes, que incluyen investigadores de múltiples Universidades y Organismos, así como de diferentes CEIs (p.e., CEI Campus Moncloa).
3. Facilitar y potenciar la visibilidad internacional de los grupos españoles en EPOS IP, así como conseguir consolidar y aumentar en lo posible el posicionamiento estratégico de los mismos en la implementación de la infraestructura.
4. Fomentar las actividades transversales en el marco de EPOS y surgidos a través del conocimiento mutuo de las actividades desarrolladas.
5. Impulsar la internacionalización de las actividades de I+D en el marco de EPOS, contribuyendo al avance del conocimiento para afrontar los desafíos que la investigación española tiene en el contexto del Espacio Europeo de Investigación.
6. Fortalecer las relaciones con organizaciones internacionales con objetivos convergentes y complementarios (p.e., EuroGeoSurveys).

Se promoverá la comunicación entre los diferentes grupos de investigación mediante la participación y desarrollo de reuniones en el marco de la red temática EPOS España a cuatro niveles:

- a) Participación de los coordinadores de los diferentes grupos en las reuniones de los WP correspondientes del proyecto EPOS IP, informando a los miembros de los grupos españoles de los resultados de las mismas y llevando cuando corresponda la idea propuesta-recomendación del grupo que coordina. Esto permitirá potenciar la participación y visibilidad de los grupos de investigación españoles en la implementación de la infraestructura EPOS.
- b) Establecimiento de una página web (<https://epos-es.org/>).
- c) Realización de reuniones de cada grupo de EPOS España y asambleas generales de la red, con presentaciones de resultados, discusiones científicas, propuestas de colaboraciones, etc.
- d) Asistencias a reuniones internacionales europeas (EGU y AHPGG) para la participación española en el desarrollo de la Infraestructura durante la fase de implementación y para la difusión del estado de EPOS España.

La futura prosperidad de Europa, y España, en una economía cada vez más competitiva, globalizada y basada en el conocimiento, depende de explotar plenamente el potencial del continente para la innovación científica y tecnológica. La investigación de vanguardia requiere cada vez más inversiones en métodos e instrumentos, y en la informática y datos, que superan la capacidad de cualquier Estado miembro. Esto muestra la necesidad de RIS como EPOS, y la necesidad de participar en ellas de forma importante y visible a través de la red temática EPOS España. El impacto de EPOS España en la ciencia y la sociedad

como red temática en España, y a través de EPOS es claro, y se refleja en: el libre acceso a una infraestructura de investigación multidisciplinar, que apoyará los avances científicos, proporcionando la disponibilidad inmediata y continua de datos de alta calidad y los medios para procesar e interpretarlos; infraestructuras de datos y servicios nacionales y centrales nuevas, contribuyendo a la información, la difusión, la educación y la formación; los planes de implementación, que requieren una inversión estratégica en los RIS a nivel nacional, europeo e internacional obtenido a través de diferentes fuentes de financiación que permitirán actualizar equipos y sistemas; las contribuciones a las actividades de mitigación de desastres y la prevención; colaboraciones con los Campos de Excelencia Internacional, favoreciendo su consolidación y el desarrollo de investigaciones punteras en el área de Ciencias de la Tierra. El desarrollo de la infraestructura EPOS a nivel nacional y europeo producirá una interacción importante con el sector industrial privado. Sirva como ejemplo la interacción ya existente entre el Grupo EPOS España Espacio y el sector industrial, en particular el espacial a través de diferentes empresas con las que se ha colaborado o se está colaborando en Proyectos de investigación de I+D+I tanto a nivel nacional como internacional.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido sufragado por los proyectos *EPOS Implementation Phase (EPOS IP)* (Grant agreement no: 676564-EPOS IP) del EU VII Framework Program, ESFRI y *Red Temática "EPOS ESPAÑA"* (CGL2016-81965-REDT) y *Clúster de cálculo y servicio en remoto del nodo español de EPOS Espacio* (UCMA15-EE-3294), del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, España.

CIGeo

**Observación de la Tierra,
Cartografía y Aplicaciones
Medioambientales**

APLICACIONES DE LOS ÍNDICES DE FRAGMENTACIÓN DE LOS USOS DEL SUELO PARA CARACTERIZAR LA EXPANSIÓN URBANA

APPLYING LU/LC FRAGMENTATION INDICES FOR CHARACTERIZATION OF URBAN SPRAWL

Marta Sapena^{*}, Luis Ángel Ruiz

Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección, Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, 46022, Valencia, España. marsamol@upv.es; laruiz@cgf.upv.es

Abstract:

The growing number of people living in urban areas implies the need for more sustainable landscape management. The analysis and monitorization of urban areas allows for the quantification and characterization of urban sprawl processes. Currently, new geospatial and statistical databases are being developed in Europe (*Urban Atlas* and *Urban Audit*) with up-to-date and homogeneous information on urban areas, easing its comparison and monitorization, as well as the development of tools for computing urban fragmentation metrics by means of these data, such as *IndiFrag*. In this work, three applications of fragmentation metrics in multiple scales are presented. Firstly, an intra-urban analysis has been conducted by municipalities in Rome in two dates. Secondly, a massive analysis, comparing at the inter-urban level the fragmentation degree for one date and their growth patterns in a sample of 68 European urban areas. Finally, multiple regression models were tested to explore the prediction of socio-economic variables using the fragmentation metrics of the 68 urban areas. The outcomes show that fragmentation metrics for the analysis of morphology, composition, and urban growth, allow for quantifying urban sprawl patterns at intra- and inter-urban levels, facilitating its relation with socio-economic variables.

Key words: Land-use/land-cover, Urban fragmentation, Fragmentation indices, *IndiFrag*, Urban sprawl, Socio-economic

Resumen:

El creciente aumento de población residente en áreas urbanas hace que sea necesaria una gestión del territorio más sostenible. El análisis y monitorización las áreas urbanas permite cuantificar y caracterizar los procesos de expansión urbana. Actualmente, se están desarrollando bases de datos geoespaciales y estadísticas a nivel europeo (*Urban Atlas* y *Urban Audit*) con información relativa a las áreas urbanas, de manera homogénea y actualizada, que facilitan su comparación y monitorización, además de herramientas para calcular métricas de fragmentación urbanas a partir de estos datos, como *IndiFrag*. En este trabajo se presentan tres aplicaciones de las métricas de fragmentación a diferentes escalas. En primer lugar, se ha elaborado un análisis intraurbano por municipios en Roma en dos fechas. En segundo lugar, un análisis masivo, donde se realiza una comparación interurbana de los niveles de fragmentación, para una fecha, y de sus patrones de crecimiento, de un total de 68 áreas urbanas europeas. Por último, se han calculado modelos de predicción de variables socioeconómicas a partir de las métricas de fragmentación de las 68 áreas urbanas. Los resultados obtenidos muestran que el análisis de la morfología, composición, y del crecimiento urbano a partir de las métricas de fragmentación es adecuado para cuantificar los patrones de expansión en escalas intra e interurbanas, posibilitando su relación con variables socioeconómicas.

Palabras clave: Fragmentación urbana, Usos del suelo. Índices de fragmentación, *IndiFrag*, Expansión urbana, Socioeconómico

1. Introducción

En Europa cerca del 72% de la población vive en áreas urbanas. El continuo proceso de desarrollo de este continente altamente urbanizado, afecta más allá de las ciudades (EEA 2017). Por ello, la monitorización de áreas urbanas y periurbanas mediante la cuantificación de los cambios en los usos del suelo y sus patrones espacio-temporales, es actualmente una prioridad en la gestión de las áreas urbanas para tratar de prevenir tanto impactos medioambientales, como en la calidad de vida de la población (Malaviya *et al.* 2010; Wei and Zhang 2012). En los últimos años se han creado diversas iniciativas para redirigir la planificación de las

áreas urbanas hacia un desarrollo más sostenible, por ejemplo: aplicando políticas de crecimiento compacto, de reciclado territorial o protección de zonas verdes, entre otros (Kompil *et al.* 2015).

La fragmentación del paisaje es el proceso de segregación espacial de los usos del suelo, principalmente desencadenada por actividades humanas y socioeconómicas (Wei and Zhang 2012), definido por Inostroza *et al.* (2013) como un patrón espacial de discontinuidad. En concreto, la fragmentación urbana refleja cómo las áreas urbanas se extienden hacia las zonas rurales (Angel *et al.* 2010) y su análisis temporal permite cuantificar el proceso de

^{*} Corresponding Author: Marta Sapena, marsamol@upv.es

expansión urbana y su eficiencia geográfica (Batty *et al.* 2003). Por lo tanto, cuantificar la fragmentación urbana puede ayudar en la planificación del territorio y en la toma de decisiones hacia un desarrollo urbano más sostenible (Jaeger *et al.* 2011).

Por ello, las métricas de fragmentación y su componente multitemporal se utilizan no sólo para describir el territorio mediante la composición espacial de los usos del suelo y sus características morfológicas, sino también para cuantificar la dinámica de los usos del suelo y el crecimiento urbano (Lausch and Herzog 2002; Malaviya *et al.* 2010; Sun *et al.* 2013).

El desarrollo de nuevas bases de datos multitemporales de usos y coberturas del suelo mediante técnicas de teledetección y SIG facilita el estudio de la fragmentación de los usos del suelo. Por ejemplo, la base de datos Europea *Urban Atlas* es parte del componente local del Servicio de monitorización terrestre de Copernicus (Copernicus 2010). Esta base de datos actualmente proporciona datos de 27 usos y coberturas del suelo en formato vectorial, a escala 1:10.000, de un total de 305 y 697 áreas urbanas para 2006 y 2012, respectivamente. Además, se prevé una actualización cada 6 años, siendo de gran interés para la monitorización de las áreas urbanas y periurbanas.

Por otro lado, existen diversas herramientas para analizar geoespacialmente el territorio. Un buen ejemplo es la herramienta *IndiFrag*, que compila un conjunto exhaustivo de índices de fragmentación aplicados para objetos cartográficos en formato vectorial (Sapena and Ruiz 2015). Al trabajar con datos de alta resolución en formato vectorial, presenta ventajas frente a otras herramientas, como el uso de las relaciones topológicas entre los objetos cartográficos, que con el formato *raster* no es posible. Además, al estar orientada al análisis urbano incluye métricas que otras aplicaciones orientadas a la ecología de paisaje no contemplan.

En este contexto, el objetivo de este trabajo es el de mostrar distintas aplicaciones de los índices de fragmentación y su análisis en diferentes escalas: intraurbana, interurbana y su evolución temporal, así como su relación con una selección de variables socioeconómicas relacionadas con la calidad de vida.

2. Datos y Metodología

En este trabajo se han utilizado dos bases de datos europeas. En primer lugar, la base de datos geoespacial *Urban Atlas*, para obtener los datos de usos del suelo de un conjunto de áreas urbanas, para los años 2006 y 2012. Los datos proporcionados están delimitados por el área funcional urbana (*functional urban area*, FUA) de cada ciudad, definida como el área total de la ciudad y de los municipios colindantes en la que su población se desplaza a la ciudad por trabajo. En segundo lugar, la base de datos socioeconómicos, *Urban Audit*, que proporciona información estadística para un conjunto de áreas urbanas con los mismos límites administrativos que las FUAs y para varias fechas, entre ellas 2006 y 2012. El proyecto de *Urban Audit* representa la versión estadística del *Urban Atlas* (Eurostat 2016). Los institutos nacionales de estadística, de forma voluntaria, proporcionan una serie de variables relacionadas con la calidad de vida sobre demografía, vivienda, salud, transporte, etc. Al estar disponible en varias fechas, la

combinación de estas bases de datos permite la comparación de áreas urbanas a lo largo del tiempo.

2.1. Métricas de fragmentación de los usos del suelo

Las métricas de fragmentación se han calculado con la herramienta *IndiFrag*, y están agrupadas en función de las propiedades que miden: área y perímetro, forma, agregación, diversidad, contraste y multitemporal. A su vez, pueden aplicarse a varios niveles jerárquicos: objeto, clase y súper-objeto (Sapena and Ruiz 2015). En este trabajo, se han calculado las métricas de los seis grupos a nivel de clase y de súper-objeto, la Tabla 1 muestra algunas de ellas. La clase es el uso del suelo de la leyenda, y el súper-objeto se refiere a los límites con los que se quiere subdividir el análisis del área urbana, este dato varía para los análisis intra e interurbano.

Las métricas de fragmentación se pueden aplicar a distintas escalas y con diferentes propósitos.

2.1.1. Análisis de fragmentación intraurbana

El estado de fragmentación de un área urbana puede ser analizado a través de la comparación de las métricas de fragmentación en las distintas unidades administrativas, evidenciando el comportamiento de cada clase o de su interrelación en distintas zonas de una misma área urbana.

El primer lugar, se ha realizado un análisis intraurbano, donde se estudia la fragmentación en una fecha y su evolución en una misma área urbana, comparando los valores obtenidos entre sus unidades administrativas. En este caso, se ha utilizado la FUA de Roma, donde los límites de sus municipios y los distritos del municipio de Roma forman los súper-objetos (Fig. 1).

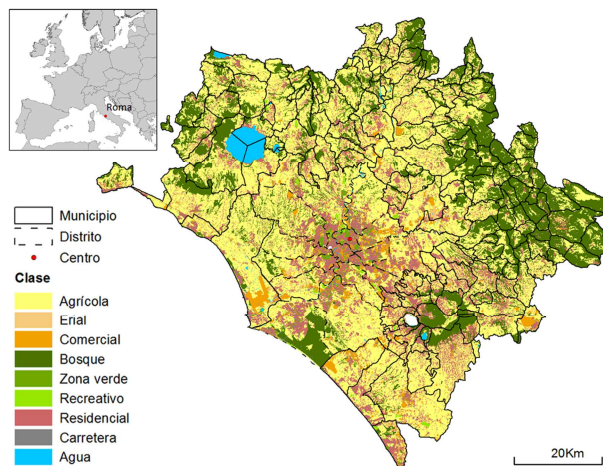


Figura 1: Zona de estudio en el análisis intraurbano. FUA de Roma con la clasificación de los usos del suelo en 2012 y unidades administrativas (municipios y distritos).

Por un lado, se han calculado las métricas a nivel de clase, para los nueve usos del suelo de la leyenda individualmente, obteniendo así un valor para cada clase y unidad administrativa, y además, las métricas a nivel de súper-objeto en 2006 y 2012. Por otro lado, se han obtenido una serie de métricas multitemporales y, además, se han calculado las diferencias entre las de fragmentación en el periodo estudiado para así

cuantificar los cambios en los usos del suelo. Finalmente, se dispone de un conjunto de valores asociados a cada unidad administrativa que permitirán

la comparación entre subzonas de una misma área urbana.

Tabla 1: Descripción de la selección de métricas de fragmentación empleadas en las tres aplicaciones, la lista completa puede consultarse en Sapena and Ruiz (2015)

	Nombre	Descripción y unidades
Área y perímetro	Densidad de clase (DC)	Ratio entre la superficie de la clase y súper-objeto (%)
	Tamaño medio (TM)	Media del tamaño de los objetos de una clase o súper-objeto (m2)
	Dimensión del borde (dimB)	Relación entre el área y perímetro de los objetos por clases
Forma	Índice de forma (IF)	Ratio normalizado que lo compara con cuadrado de la misma área.
	Dimensión fractal ponderada (DFP)	Media de la dimensión fractal ponderada por el área del objeto
	Ratio medio del perímetro-área (RMPA)	Describe la relación entre el área y perímetro del objeto
Agregación	Número de objetos (N)	Número de objetos por clase o súper-objeto
	Densidad de objetos (DO)	Número de objetos por kilómetro cuadrado de una clase o súper-objeto (n/km2)
	Distancia estándar ponderada (DEP)	Distancia media de los objetos ponderada por su área al centroide del súper-objeto (m)
	Distancia euclídea media del vecino más próximo (DEM)	Distancia media entre los vecinos más próximos en una clase (m)
Diversidad	Diversidad de Shannon (DSHAN)	Abundancia proporcional de cada clase en el súper-objeto
	Fragmentación funcional Abs. (IFFA)	Nivel de integración funcional de las clases
Multitemporal	Densidad-diversidad (DD)	Cantidad de cada clase teniendo en cuenta su proporción total
	Índice de expansión medio ponderado (AWM)	Suma ponderada por el área de los nuevos objetos en función del tipo de crecimiento relleno, expansivo o aislado
	Proporción del cambio (CP)	Ratio entre la superficie cambiada y el súper-objeto (%)
	Ratio de cambio (RC)	Ratio anual de cambio (%)

2.1.2. Análisis de fragmentación interurbana

Para llevar a cabo el análisis interurbano se han seleccionado las áreas urbanas que disponían de datos en *Urban Atlas* para las dos fechas y, además, que tuvieran información socioeconómica relacionada disponible en la base de datos de *Urban Audit* en las dos fechas. Una vez preseleccionadas las que cumplían estas condiciones, se incluye otra restricción, debido a que en el periodo de actualización del *Urban Atlas* (entre 2006 y 2012) la definición de FUA se revisó, cambiando los límites de algunas áreas urbanas. Por ello, en la selección final se comprobó que al menos el 80% de la superficie de las FUAs de las dos fechas fuera coincidente, para evitar así incompatibilidades con los límites de las FUAs de *Urban Audit*.

Finalmente, se dispone de un total de 68 FUAs europeas, localizadas principalmente en Alemania, Rumanía, Eslovaquia y Reino Unido. Del mismo modo que en el ejemplo anterior, se han aplicado las métricas a nivel de clase y súper-objeto, con diferencia de que en este caso los súper-objetos son los límites de las áreas urbanas, es decir, de la FUA. De este modo, las métricas de fragmentación permiten la comparación entre distintas áreas urbanas. En la Figura 2 se muestra la distribución de las FUAs seleccionadas y sus límites. Se puede observar la alta variabilidad de sus tamaños,

la característica común de estas FUAs es que se trata de áreas urbanas con población mayor a 100.000 habitantes.

Para reducir el número de métricas a analizar y evitar redundancias se han seleccionado aquellas que no presentan alta correlación, por un lado entre los índices de una fecha y, por otro, entre los multitemporales. A continuación se ha realizado un análisis de componentes principales para reducir la dimensionalidad de los datos, obteniendo así un conjunto menor de métricas significativas (Sapena *et al.* 2016). Este tipo de análisis estadísticos han sido aplicados en varios estudios para descartar variables muy correladas, como por ejemplo en Schwarz (2012).

2.2. Variables socioeconómicas

La relación de las métricas de fragmentación y variables socioeconómicas se ha realizado aprovechando la disponibilidad de la base de datos europea *Urban Audit* con los mismos límites administrativos que *Urban Atlas*. La disponibilidad de las variables en varias fechas dependerá de los países colaboradores. La combinación de las dos bases de datos multitemporales tiene un gran potencial para la monitorización de áreas urbanas.

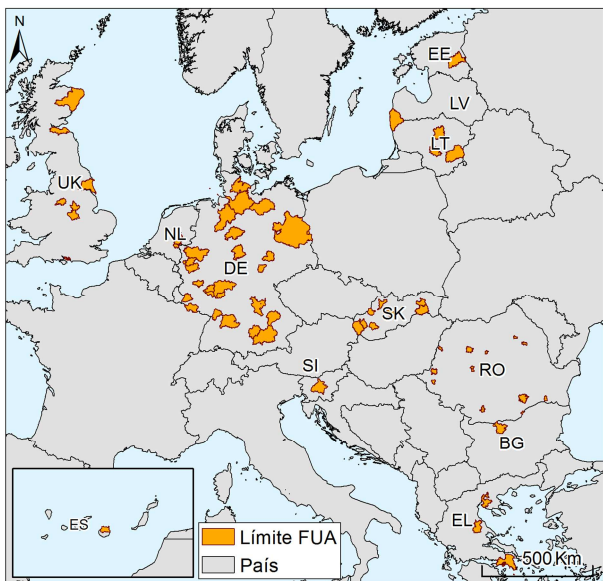


Figura 2: Zonas de estudio en el análisis interurbano con el límite de la FUA. Los países incluidos son Bulgaria (BG), Alemania (DE), Estonia (EE), Grecia (EL), España (ES), Lituania (LT), Letonia (LV), Países Bajos (NL), Rumanía (RO), Eslovenia (SI), Eslovaquia (SK), y Reino Unido (UK). Fuente: GISCO - Eurostats (Comisión Europea).

Las métricas de fragmentación utilizadas como descriptores en el modelo son las extraídas en el análisis interurbano (sección 2.1.2). La selección de variables socioeconómicas (variables dependientes) está restringida para que todas tengan dato en al menos 25 de las 68 FUAs y así tener suficientes observables en el análisis estadístico. En este caso, se muestra un total de 10 variables para 2006, 2012 y sus diferencias, con las que se obtuvieron relaciones significativas con las métricas (Tabla 2).

Tabla 2: Listado, descripción y número de observables de las variables socioeconómicas seleccionadas

Variable	Descripción	FUAs
pop1	Población 1 enero	65
popres	Densidad de población en suelo residencial	65
inc	Media del ingresos disponibles anuales por hogar	25
prchild	Proporción de hogares con menores	30
act	Población activa económicamente	54
rtact	Ratio de actividad	25
unemp	Población sin empleo	46
rtun	Ratio de desempleo	30
avlen	Longitud media de camino al trabajo en coche	25
killac	Personas fallecidas en accidente de coche cada 10.000 habitantes	48

Se ha realizado un análisis exploratorio de predicción de las variables socioeconómicas basado en métricas de fragmentación y sus cambios, mediante el método estadístico de regresión múltiple paso a paso. Los

modelos de regresión se han calculado para 2006, 2012 y sus diferencias.

3. Resultados y discusión

En esta sección se comentan los resultados obtenidos en los tres análisis, se ha dividido por las mismas subsecciones que en el apartado de metodología.

3.1. Interpretación espacio-temporal intraurbana

La propiedad de agregación muestra la tendencia de los elementos a agregarse espacialmente. Un buen ejemplo es la Distancia euclídea media del vecino más próximo (DEM), que informa sobre la separación entre los elementos de una misma clase. Este índice para la clase residencial en Roma (Fig. 3) muestra dos comportamientos diferenciados. Se observan aquellos municipios con un grado de concentración de los elementos de uso residencial muy elevado en color azul, con una distancia media entre ellos menor o igual a 30 metros, sugiriendo que se trata de áreas muy compactas en cuanto a este uso. Esta información puede completarse con símbolo gradual que representa la Densidad de la clase (DC) residencial en ese municipio. El análisis combinado de estas variables facilita su interpretación. Se puede observar que los municipios con baja densidad residencial en su mayoría presentan distancias medias mayores a los 85 metros, indicando en este caso que los municipios de la zona norte y nordeste de Roma presentan una cobertura residencial poco densa y muy fragmentada con respecto al resto de municipios en 2012.

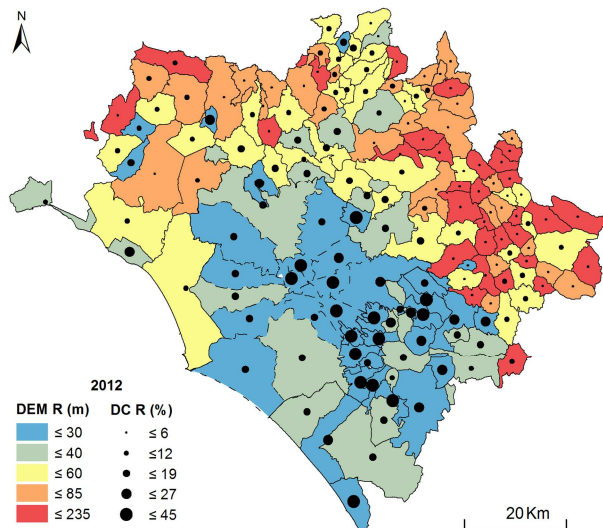


Figura 3: Representación gráfica de la Distancia Euclídea Media del vecino más próximo (DEM) y de la Densidad de Clase (DC) del uso residencial para el año 2012.

Por otro lado, la diversidad es una propiedad que informa sobre la riqueza, en este caso en función del número de clases presente, y su uniformidad, el equilibrio entre ellas, en una unidad administrativa. Esta propiedad puede representarse a partir del índice Densidad-Diversidad (DD) dotando a cada municipio de un valor entre 0 (cuando sólo hay una clase) y 9 (igual al número de clases, cuando están todas presentes en la misma proporción), por ejemplo, en la Figura 4 se

observa cómo los valores más bajos se encuentran en municipios principalmente de uso forestal o agrícola.

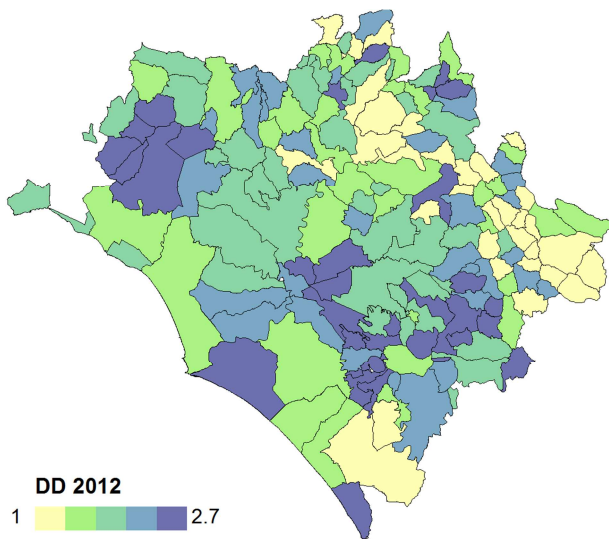


Figura 4: Representación gráfica de la Densidad-Diversidad (DD) para el año 2012.

Cuando se analizan las métricas de fragmentación a lo largo del tiempo, se pueden obtener patrones de crecimiento de los municipios. Por ejemplo, la combinación de los índices de Expansión media ponderada (AWM) y la Proporción del cambio (CP) refleja la tendencia de crecimiento más o menos fragmentado por municipios de una misma área urbana. Un ejemplo de su interpretación puede verse en (Sapena *et al.* 2015). Otro ejemplo combinando métricas se presenta en la Figura 5, donde se muestra la cantidad y tipo de crecimiento de la clase residencial por municipio y, a su vez, la proporción de cambio que ha tenido lugar en la clase de zonas verdes. Los tres tipos de crecimiento descritos son: relleno, cuando el nuevo objeto esta parcial o totalmente rodeado por otro de la misma clase; expansivo, cuando se desarrolla en la frontera de la clase; y aislado, si está totalmente separado de la clase (Wilson *et al.* 2003). La combinación del crecimiento de tipo relleno y expansivo indica un crecimiento compacto, mientras que el tipo aislado es un crecimiento fragmentado. Se observa de nuevo en la zona norte y nordeste, que además de ser municipios muy fragmentados en 2012, el proceso de expansión entre 2006 y 2012 fue en su mayoría muy disperso. Al contrario, los municipios costeros y de la zona sur presentan un crecimiento residencial compacto. Por otro lado, el crecimiento de las zonas verdes en la parte periférica de la FUA es prácticamente nulo, mientras que en los distritos de Roma hay un aumento general de hasta el 0,8%, excepto en los distritos más céntricos por ser ya muy compactos.

En resumen, se han observado dos zonas claramente diferenciadas a partir de las métricas de fragmentación aplicadas de manera intraurbana en la FUA de Roma. En primer lugar, la zona periférica de la FUA presenta un paisaje menos denso y diverso, y más fragmentado, donde su proceso de expansión sigue esa tendencia y las zonas verdes no han aumentado, probablemente al tratarse de zonas forestales con edificaciones aisladas y mucha vegetación. En segundo lugar, la zona costera y central de la FUA, presenta mayor diversidad (ya que

hay más variedad en los usos de suelo urbanos, que son los que principalmente forman la leyenda), tienen mayor densidad de suelo residencial y su distribución espacial es más compacta, acompañado de una tendencia de crecimiento de la clase residencial muy agregada, y en general, un aumento positivo de las zonas verdes.

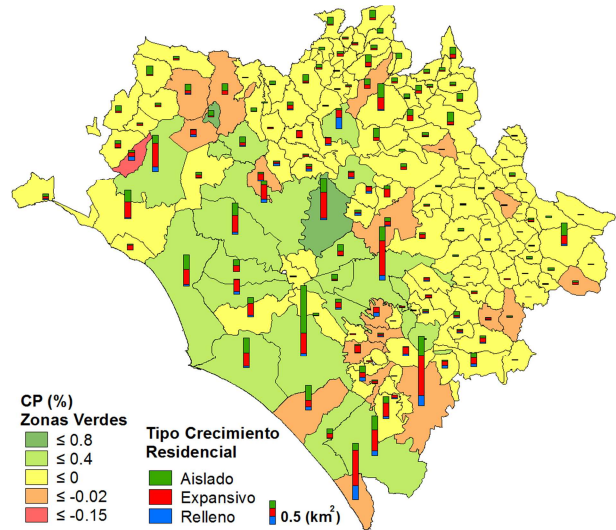


Figura 5: Representación gráfica de la proporción del cambio (CP) de la clase de zonas verdes y el tipo de crecimiento de la clase residencial entre 2006 y 2012, por municipio.

3.2. Comparación interurbana

Se ha llevado a cabo un cálculo masivo de métricas de fragmentación en 68 áreas urbanas, que permite realizar comparaciones del estado de fragmentación en un momento concreto y de su evolución. Se han realizado varios análisis, por ejemplo, en la Figura 6 se representan las 68 FUAs clasificadas por países y ponderadas por su tamaño, donde su posición en el eje de abscisas muestra las distancias medias del vecino más próximo del uso residencial, y el eje de las ordenadas su densidad en 2012. Las FUAs localizadas en el extremo derecho presentan un grado de fragmentación mucho más elevado que el resto, además, se caracterizan por su baja densidad de suelo residencial. Sin embargo, las que están en el extremo izquierdo, independientemente de su densidad, son áreas muy compactas en cuanto a este uso.

La Figura 7 muestra cinco ejemplos extraídos de la Figura 6, con distintos niveles de fragmentación, densidad y tamaño de FUA. Se observa que las FUAs más fragmentadas (Aberdeen en Reino Unido y Liepaja en Letonia) tienen un núcleo residencial localizado en la ciudad, mientras que el resto de suelo residencial se encuentra disperso en toda su extensión. Al contrario, en las más compactas, la distribución del uso residencial es más homogénea espacialmente, tanto en la ciudad como en el resto de municipios.

En general, se observa que las FUAs alemanas y eslovacas están agrupadas en la Figura 6, indicando en este caso que la clase residencial en 2012 es muy compacta. Al contrario, las FUAs de Reino Unido tienen un comportamiento más variado, ya que presentan valores de DEM muy dispares, como por ejemplo con Aberdeen y Portsmouth, en la Figura 7.

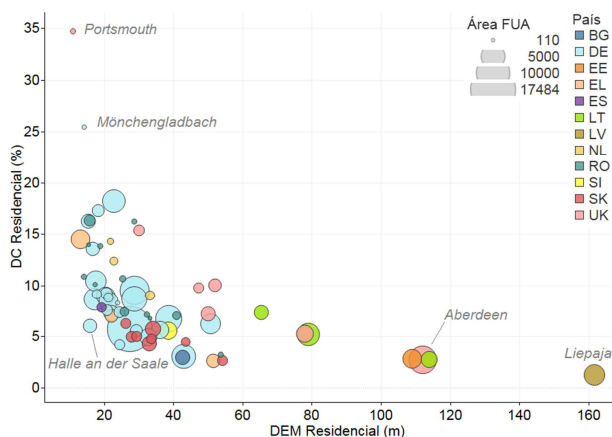


Figura 6: Distribución de las FUAs en función de la Distancia euclídea media del vecino más próximo (DEM) y de la Densidad de clase del uso residencial. El tamaño del punto viene definido por el tamaño de la FUA y el color por el país al que pertenece.

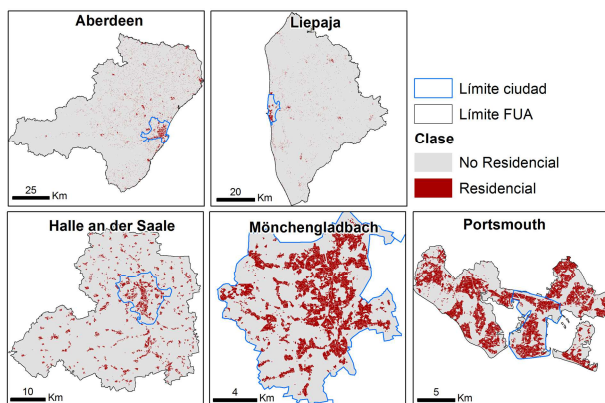


Figura 7: Ejemplo de las FUAs con mayor y menor grado de fragmentación respecto al uso residencial en 2012, puede verse su localización en la Figura 6 mediante una etiqueta con su nombre.

Sin embargo, el análisis temporal, independientemente del estado actual de fragmentación, informa sobre el proceso de expansión urbana que está teniendo lugar en una determinada zona. En la Figura 8 se muestran las FUAs en función de la Proporción de cambio (CP) de la clase residencial en el eje de ordenadas y el Índice de Expansión medio ponderado (AWM) de la misma clase en las abscisas. El tamaño del punto está en función de la Densidad de la clase (DC) residencial que resulta en 2012, y el color indica el país al que pertenece. En primera instancia, se observa que las FUAs rumanas son las que más se han desarrollado, con un crecimiento mixto entre fragmentado y compacto, alcanzando unas densidades de suelo residencial de alrededor del 15%. En segundo lugar, se observan tendencias en los procesos de expansión en función del país, puede observarse en la Figura 8 cómo las FUAs se encuentran agrupadas por países. Por ejemplo, las FUAs alemanas de una densidad intermedia-alta en 2012, han experimentado un crecimiento de la clase residencial reducido, en su mayoría con una tendencia compacta, de manera similar sucede con las de Reino Unido. Eslovaquia, también tiene un patrón definido, con un crecimiento también suave, pero en este caso más fragmentado. Por último, el proceso de crecimiento más fragmentado se encuentra en la FUA española (Las

Palmas de Gran Canaria), ya que el tipo de crecimiento aislado es un 68% del crecimiento residencial total, sin embargo, en 2012 se considera una de las FUAs más compactas a pesar de que su proceso de expansión haya sido mayormente disperso.

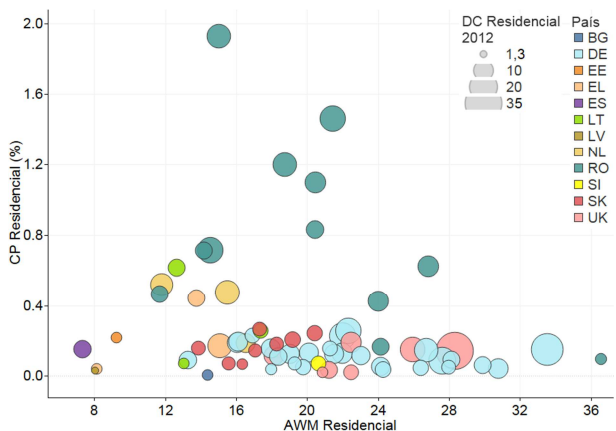


Figura 8: Distribución de las FUAs en función de la Proporción del Cambio Residencial (CP) y de su Índice de Expansión Medio Ponderado (AWM). El tamaño del punto viene definido por la Densidad de la Clase residencial en el año 2012 y el color por el país al que pertenece.

3.3. Modelos de predicción socioeconómicos

Una tercera aplicación de las métricas de fragmentación es la de su relación con las variables socioeconómicas. Por lo tanto, se ha realizado un análisis exploratorio en el que se han calculado varios modelos para evaluar las relaciones existentes entre las métricas de fragmentación y las variables socioeconómicas. En la Tabla 3 se muestran los resultados de algunos modelos con coeficiente de determinación mayor de 0,5. El número de observaciones varía en cada modelo en función de los datos disponibles, el significado de cada variable y número de FUAs u observables se puede consultar en las Tablas 1 y 2.

En general, se observa que los modelos de población (pop1) están muy influenciados por las métricas que dependen del tamaño, por ejemplo, número de objetos (N) y tamaño medio (TM) del uso residencial. Sin embargo, cuando se omiten del modelo también se obtienen modelos en función de la diversidad y distribución de los objetos con un $R^2 \approx 0,75$. Por otro lado, la variable de densidad de población respecto al uso residencial (popres) no está tan afectada por el tamaño, pero sí por la forma y su configuración. En cuanto a la variable relacionada con los ingresos medios (inc), sus observables se reducen a las FUAs alemanas, aunque no sea un modelo muy robusto, está influido por la heterogeneidad, tamaño de los objetos y densidad de zonas verdes. Mientras que su variación en el tiempo, se puede explicar por la variación del tamaño de los elementos de uso recreativo y el cambio de la clase comercial. Por otro lado, las variables relacionadas con el empleo en una fecha (act y unemp) están relacionadas en gran medida con el uso residencial y comercial, en concreto su tamaño, superficie y distribución.

Tabla 3: Listado de los modelos de regresión con las variables socioeconómicas como dependientes y las de fragmentación independientes. La letra tras el índice indica la clase, donde residencial (R), comercial (C), recreativo (L) y zonas verdes (G). Si la variable es negativa significa que tiene una influencia negativa en el modelo. La "d" significa la diferencia de la métrica entre las dos fechas.

Var. Socio económica	Fecha	Variables descriptoras	R ² ajust.
pop1	2006	DSHAN, N_R, TM_R	0,90
	2012	RMPA, -DEM_C, TM_R, N_R	0,93
popres	2006	RMPA, TM_C, -DEM_C, -IF_L	0,80
	2012	RMPA, IFFA, -DEM_C	0,56
inc	06/12	-dTM_L, RC_C	0,65
prchild	2006	-TM, DEM_L	0,79
	2012	RMPA, TM_L, DEM_L	0,62
act	2006	DEP, -DEM_C, N_R, TM_R	0,92
rtact	06/12	dDEM_G, dDimB_L	0,75
unemp	2006	TM_C, N_R	0,72
rtunemp	06/12	-dDFP_G, RC_R	0,53
avlen	06/12	dDimB_C, dRMPA_L, dDEP_R, RC_C	0,82
killac	2006	IFFA, IF_G, DEM_L, -DD_R	0,66

Los modelos calculados para los ratios de actividad y desempleo (rtact y rtun) revelan una relación positiva con el crecimiento de zonas verdes y cambios en los servicios de recreo. Por último, las variables relacionadas con el transporte (avlen), tienden a cambiar en función de los cambios en las distancias al centro del uso residencial y la intensidad de cambio del uso comercial.

Aunque se han observado relaciones entre las métricas de fragmentación y las variables socioeconómicas, hay otras variables que todavía no han podido analizarse por no encontrar ninguna correlación significativa con las métricas, como por ejemplo variables relacionadas con la fertilidad, mortalidad, nivel de educación, etc.

Además, la falta de disponibilidad de datos en el periodo estudiado hace que el análisis esté limitado, sin embargo, la base de datos estadísticos está todavía en proceso de desarrollo y se espera, además de su actualización, nuevas variables relacionadas con la calidad de vida de la población.

4. Conclusiones

Este trabajo muestra el potencial en cuanto a aplicaciones e interpretación de las métricas de fragmentación en entornos urbanos, en concreto para la monitorización de la expansión urbana. Los SIG permiten el análisis espacial de los datos y el desarrollo de aplicaciones como *IndiFrag*, que hacen posible la creación de metodologías, que permiten cuantificar y evaluar la evolución del paisaje urbano.

Las tres aplicaciones presentadas evidencian la aptitud de las métricas de fragmentación de los usos del suelo para describir la morfología, estructura y evolución de áreas urbanas a distintas escalas, facilitando así la comparación inter e intraurbana de los procesos de expansión urbana, incluso en periodos cortos de tiempo. También se ha podido comprobar la relación que existe entre las variables socioeconómicas y la distribución espacial de los usos del suelo, su complejidad y los cambios estructurales de las áreas urbanas. Este estudio podría ayudar al desarrollo de nuevas políticas sostenibles a nivel local, ya que las áreas urbanas crecen en función de las demandas económicas y de la población, y este trabajo evidencia su interrelación. Sin embargo, todavía quedan aspectos a analizar a causa de la falta de datos del *Urban Audit*. En trabajos futuros se pretende evaluar el comportamiento de las métricas de fragmentación frente a un conjunto de escenarios modelizados que simulen patrones de crecimiento diferentes.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad y FEDER, en el marco del proyecto CGL2016-80705-R y con el contrato del Fondo de Garantía Juvenil PEJ-2014-A-45358.

References

- ANGEL, S., PARENT, J. and CIVCO, D.L., 2010. The fragmentation of urban footprints: global evidence of sprawl, 1990-2000. *Lincoln Institute of Land Policy, Working Paper*, pp. 1-100.
- BATTY, M., BESUSSI, E. and CHIN, N., 2003. Traffic, urban growth and suburban sprawl. *Centre for Advanced Spatial Analysis, Working Paper 70*, London, UK, pp. 1-12.
- COPERNICUS, 2010. Copernicus Land Monitoring Services - The European Earth Observation Programme - Local Component. Disponible: <http://land.copernicus.eu/local> [7/28,2015].
- EEA, 2017. European Environmental Agency - About urban environment. Disponible: <https://www.eea.europa.eu/themes/sustainability-transitions/urban-environment/about-urban-environment> [5/01,2017].
- EUROSTAT, 2016. Cities (Urban Audit) - Database. Disponible: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/cities/data/database> [3/15,2016].
- INOSTROZA, L., BAUR, R. y CSAPLOVICS, E., 2013. Urban sprawl and fragmentation in Latin America: A dynamic quantification and characterization of spatial patterns. *Journal of Environmental Management*, **115**, pp. 87-97. DOI:10.1016/j.jenvman.2012.11.007.
- JAEGER, A.G., SOUKUP, T., MADRIÑÁN, L.F., SCHWICK, C. and KIENAST, F., 2011. Landscape fragmentation in Europe, EEA Report. DOI:10.2800/78322.

- KOMPIL, M., AURAMBOUT, J.-P., BARRANCO, R.R., BARBOSA, A., CRISIONI, C.J.-, PISONI, E., ZULIAN, G., VANDECASTEELE, I., TROMBETTI, M., VIZCAINO, P., VALLECILLO, S., SILVA, F.B. E, BARANZELLI, C., RIVERO, I.M., MAES, J. and LAVALLE, C., 2015. European cities: territorial analysis of characteristics and trends - An application of the LUISA Modelling Platform (EU Reference Scenario 2013 - Updated Configuration 2014), EUR 27709 EN. DOI:10.2788/737963.
- LAUSCH, A. and HERZOG, F., 2002. Applicability of landscape metrics for the monitoring of landscape change: Issues of scale, resolution and interpretability. *Ecological Indicators*, **2**, pp. 3-15. DOI:10.1016/S1470-160X(02)00053-5.
- MALAVIYA, S., MUNSI, M., OINAM, G. and JOSHI, P.K., 2010. Landscape approach for quantifying land use land cover change (1972-2006) and habitat diversity in a mining area in Central India (Bokaro, Jharkhand). *Environmental Monitoring and Assessment*, **170**, pp. 215–229. DOI:10.1007/s10661-009-1227-8.
- SAPENA, M. and RUIZ, L.A., 2015. Descripción y cálculo de índices de fragmentación urbana : Herramienta *IndiFrag*. *Revista de Teledetección*, **43**, pp. 77-89. DOI:http://dx.doi.org/10.4995/raet.2015.3476.
- SAPENA, M., RUIZ, L.A. and GOERLICH, F.J., 2016. Analysing relationships between urban land use fragmentation metrics and socio-economic variables. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **XLI-B8**, pp. 1029-1036. DOI:10.5194/isprsarchives-XLI-B8-1029-2016.
- SAPENA, M., RUIZ, L.A. and PALOMAR, J.M., 2015. Estudio evolutivo de los usos del suelo urbano mediante índices de distribución espacio-temporal. *XVI Congreso de la Asociación Española de Teledetección*. Sevilla. pp. 64-67.
- SCHWARZ, N., 2010. Urban form revisited-selecting indicators for characterising European cities. *Landscape and Urban Planning*, **96**, pp. 29-47. DOI:10.1016/j.landurbplan.2010.01.007.
- SUN, C., WU, Z.F., LV, Z.Q., YAO, N. and WEI, J.B., 2013. Quantifying different types of urban growth and the change dynamic in Guangzhou using multi-temporal remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **21**, pp. 409-417. DOI:10.1016/j.jag.2011.12.012.
- WEI, Y. and ZHANG, Z., 2012. Assessing the fragmentation of construction land in urban areas: An index method and case study in Shunde, China. *Land use policy*, **29**, pp. 417-428. DOI:10.1016/j.landusepol.2011.08.006.
- WILSON, E.H., HURD, J.D., CIVCO, D.L., PRISLOE, M.P. and ARNOLD, C., 2003. Development of a geospatial model to quantify, describe and map urban growth. *Remote Sensing of Environment*, **86**, pp. 275-285. DOI:10.1016/S0034-4257(03)00074-9.

DISPERSIÓN URBANA Y SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL EN LA COMUNITAT VALENCIANA

URBAN SPRAWL AND ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY IN VALENCIA

Salva Miñana-Fayos^{a,*}, Eric Gielen^b, Gabriel Riutort-Mayol^c

^a Ingeniero en Geodesia y Cartografía, Licenciado en Geografía. salvaminyana@hotmail.com

^b Departamento Urbanismo. Universitat Politècnica de Valencia. Camino vera S/N, 46022 Valencia. egielen@urb.upv.es

^c Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría. Universitat Politècnica de Valencia. Camino vera S/N, 46022 Valencia. gabriuma@upv.es

Abstract:

The territory is configured by different urban models. During the last decades the tendency in many European countries has been forward to an urban sprawl development model. This kind of development causes several economic, social and environmental effects. This paper is focused on studying the environmental effects of the urban sprawl model for all municipalities of Valencia. These effects are measured over a set of 14 environmental indicators. First of all, an urban sprawl index is calculated by means of the Principal Component Analysis technique from the three more characteristic variables of the sprawl phenomenon. Finally, a regression model with spatially correlated effects is formulated with the aim of estimating the effects of the urban sprawl model on the environmental indicators. It is concluded that the sprawl model causes significant effects on most of the environmental indicators.

Key words: Urban Sprawl, Environmental Sustainability, Spatial Regression Model, Geographic Information System. Comunitat Valenciana

Resumen:

El territorio está configurado por distintos modelos urbanos y la tendencia en las últimas décadas y en muchas ciudades de Europa ha sido hacia un modelo de crecimiento disperso. Este tipo de crecimiento disperso ha llevado consigo fuertes cambios en los usos del suelo en algunas regiones, produciendo fuertes presiones y efectos territoriales, ambientales y socio-económicos considerables. El presente artículo estudia los efectos ambientales de este tipo de crecimiento urbano disperso en el conjunto de los municipios de la Comunitat Valenciana. En primer lugar, se elabora un índice que mide el nivel de dispersión urbana en cada municipio. Este índice de dispersión se obtiene mediante el cálculo del factor común (primera componente principal del Análisis de Componentes Principales) a un conjunto de tres indicadores característicos del modelo urbano disperso: la densidad neta de viviendas, la compacidad del suelo urbano y la magnitud o extensión del suelo urbano en el municipio. En segundo lugar, se observa un conjunto de catorce indicadores de sostenibilidad ambiental relacionados con el metabolismo urbano, infraestructuras, zonas verdes y movilidad. Finalmente, se plantea un modelo estadístico de regresión con efectos correlados espacialmente con el objeto de determinar el efecto del nivel de dispersión urbana sobre los diferentes indicadores de sostenibilidad ambiental observados. Los resultados concluyen que el modelo urbano disperso genera efectos significativos sobre la mayoría de los indicadores ambientales elegidos.

Palabras clave: Dispersión Urbana, Sostenibilidad Ambiental, Modelo de Regresión Espacial, Sistema de Información Geográfica, Comunitat Valenciana

1. Introducción

El siglo XX, sobre todo en la segunda mitad, ha estado marcado por un acelerado proceso de urbanización en todo el planeta: el 80% de la población de España vive en áreas urbanas. Las ciudades se han ido organizando según distintos modelos urbanos. Cada región ha ido desarrollándose acorde a un modelo de crecimiento urbano distinto, y dando lugar a una ocupación del territorio diferente. En las últimas décadas, la tendencia ha sido hacia modelos de crecimientos dispersos o menos compactos. Esta expansión urbana dispersa, constituye uno de los factores que más ha influido en los

cambios de uso del suelo en algunas regiones, produciendo fuertes presiones y efectos territoriales considerables. Este fenómeno de desarrollo urbano, se ha dado con gran intensidad en el arco mediterráneo a expensas de la agricultura y zonas de bosque.

La dispersión urbana es un fenómeno complejo, multidimensional y multiescala; una de sus características más relevantes es que el consumo de suelo crece más rápido que la población. Son muchas y diferentes las causas, principalmente de tipo social, demográfico y económico, que han dado lugar al aumento de este tipo de modelo urbano (Muñiz *et al.* 2006). Catalán *et al.* (2007) considera este fenómeno

* Corresponding Author: Salva Miñana-Fayos, salvaminyana@hotmail.com

como un proceso urbano relacionado con la madurez económica de las ciudades. Las causas pueden ser diversas en función del contexto histórico o geográfico de cada región, pero las consecuencias siempre son las mismas, produciendo una transformación de las características del territorio y creando nuevas estructuras y áreas funcionales modificando las actuales (Rueda 2002). Todo ello provoca una serie de efectos económicos, sociales y ambientales.

Por otro lado, el concepto de la sostenibilidad urbana se define como una nueva forma de gestión de las zonas urbanas. De forma general, la sostenibilidad urbana engloba tres aspectos diferenciados: cohesión social, sostenibilidad económica y territorial, y sostenibilidad ambiental (López 2013). En este trabajo nos centramos principalmente en el estudio de efectos relacionados con los aspectos ambientales de la sostenibilidad urbana, ya que éstos, en su gran mayoría, derivan del sistema urbano implantado en el territorio. Entre las consecuencias ambientales causadas por el modelo urbano disperso se pueden destacar: la destrucción de paisajes, el aumento del metabolismo urbano, la pérdida de suelo fértil, la impermeabilización del suelo, el aumento de la movilidad, el aumento del uso del coche y la pérdida de biodiversidad (Entrena 2005).

Las zonas urbanas son claves en el proceso de alteración de los equilibrios ambientales, de forma que analizar este proceso en relación al modelo urbano puede ayudar a conocer sus efectos y a plantear políticas territoriales que consigan unas ciudades más sostenibles.

2. Objetivos

El objetivo principal que se persigue en este estudio es analizar y cuantificar la relación que existe entre el nivel de dispersión urbana de los municipios de la Comunitat Valenciana y distintos indicadores de sostenibilidad ambiental, con el fin de conocer algunos de los efectos que tiene el modelo urbano disperso sobre el medio ambiente.

Para la consecución de este objetivo se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Creación y cálculo de un índice de dispersión urbana para el conjunto de los municipios de la Comunitat Valenciana, a partir del análisis de una serie de variables características del modelo disperso.
- La medición y elaboración de indicadores municipales de sostenibilidad ambiental relacionados con los ámbitos de metabolismo urbano, infraestructuras, zonas verdes y movilidad.
- La estimación de los efectos que sobre los diferentes indicadores de sostenibilidad tiene el nivel de dispersión urbana de un municipio, a partir de la formulación de un modelo estadístico de regresión espacial.

3. Metodología

3.1. Revisión bibliográfica sobre dispersión urbana y sostenibilidad ambiental

La dispersión urbana afecta a todo el planeta, aún así no dispone de una definición universal. Se trata de un fenómeno complejo, ya que es multidimensional y multiescala (Zeng *et al.* 2014). La aproximación que suele dársele a la medición y caracterización del fenómeno de la dispersión urbana es a partir de la obtención de diferentes indicadores característicos, especialmente relacionados con aspectos morfológicos y demográficos de la ocupación del territorio. La densidad neta es el factor que aparece en la mayoría de trabajos sobre caracterización de la dispersión urbana (Angel *et al.* 2014; Frenkel and Ashkenazi, 2008; Colaninno *et al.* 2011; Gielen *et al.* 2017). La dispersión entre las manchas de suelo urbano es otro de los factores muy representativos de un modelo urbano disperso (Angel *et al.* 2014; Colaninno *et al.* 2011; Gielen *et al.* 2017). La fragmentación de usos en el espacio urbano es también representativo de un modelo disperso, por el contrario la mezcla de usos es más representativa de un modelo compacto (Frenkel and Ashkenazi 2008; Arribas-Bel *et al.* 2011).

Así mismo, la complejidad de la forma de la superficie abarcada por suelo urbano es también un factor característico de un modelo compacto, en cambio formas menos complejas y más regulares tienden a ser características de modelos más dispersos (Zeng *et al.* 2014; Colaninno *et al.* 2011). La ocupación del espacio libre, la concentración de edificios, así como la proporción de suelo urbano discontinuo y compacto dentro del suelo urbano, son también factores que se utilizan como medidas representativas del fenómeno de la dispersión (Gielen *et al.* 2017). Por último, la magnitud o proporción que abarca el suelo urbano en el territorio es un factor a tenerse en cuenta ya que es un factor importante en relación a las consecuencias derivadas de este tipo de modelos sobre el territorio (Gielen *et al.* 2017).

Por otro lado, las técnicas estadísticas multivariantes tradicionales como el análisis factorial y el análisis de componentes principales son las técnicas más comúnmente utilizadas con el objetivo de agregar y sintetizar en un único o varios factores la información contenida en todas estas variables relacionadas con el fenómeno de dispersión urbana (Mezzeti and Billari 2005; Frenkel and Ashkenazi, 2008).

En cuanto a la sostenibilidad ambiental, son muchas las entidades y autores que definen indicadores para medir y analizar la sostenibilidad urbana en todos sus ámbitos. El Observatorio de la Sostenibilidad en España emite un informe anual de Sostenibilidad por provincia evaluado sobre indicadores característicos de las distintas dimensiones de sostenibilidad urbana; indicadores socioeconómicos, ambientales y de sectores productivos, con el fin de conocer el nivel de sostenibilidad y así poder controlar el éxito de determinadas medidas o acciones que se van tomando. A menor escala, existe el Sistema Municipal de Indicadores de Sostenibilidad Urbana y Local creado por la Red de Redes de Desarrollo Local y Sostenible. Este sistema de indicadores abarca seis dimensiones;

ocupación del suelo, complejidad urbana, movilidad sostenible, metabolismo urbano, cohesión social y biodiversidad. Se trata de indicadores homogéneos que permiten el seguimiento de la Estrategia Española de Sostenibilidad Urbana y Local y facilitan la comparación del grado de sostenibilidad de cualquier municipio de España.

Entre los efectos que el modelo de ciudad dispersa puede causar sobre los aspectos relacionados con el medioambiente se encuentran el aumento de la fragmentación del territorio afectando a la estabilidad ambiental (Rueda 2002), el aumento de los costes energéticos y el aumento del consumo de recursos (Rueda 2002; Entrena 2005; Muñiz *et al.* 2006). También, se han realizado estudios que demuestran un efecto significativo en la instalación de redes de abastecimiento y saneamiento de aguas, así como en el coste por habitante en alumbrado público (Bereciartúa 2006).

3.2. Fuentes de información

Para la obtención de las variables relacionadas con la dispersión urbana se han utilizado principalmente dos fuentes de información:

- La base de datos del Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España (SIOSE), a partir de la cual se ha obtenido la superficie de suelo urbano mixto y urbano discontinuo pertenecientes al año 2011.
- El censo de población y viviendas del año 2011 (Instituto Nacional de Estadística), a partir del cual se ha obtenido el número de viviendas por municipio.

Por otro lado, para la obtención de los indicadores de sostenibilidad ambiental se han utilizado las siguientes fuentes de información:

- Encuesta de Infraestructuras y Equipamientos Locales (EIEL), gestionada por las diputaciones provinciales y de donde se han obtenido indicadores relacionados con el consumo de recursos y de infraestructuras: consumo de agua, volumen de residuos, puntos de luz, contenedores, superficie verde, red de tuberías y red de saneamiento.
- La base de datos espacial *CartoCiudad*, perteneciente al Instituto Geográfico Nacional (IGN), de donde se ha obtenido el indicador de viario urbano.
- Banco de datos territorial perteneciente al Instituto Valenciano de Estadística, de donde se ha obtenido el indicador de número de vehículos.
- Base de datos de la Entidad de Saneamiento de Aguas Residuales de la Comunitat Valenciana de la cual se ha obtenido el indicador de volumen de agua tratada.
- Base cartográfica 1:5000 del Instituto Cartográfico Valenciano, de donde se ha obtenido la superficie de piscinas.

- Censo de población y viviendas del IGN, de donde se han obtenido los indicadores relacionados con la movilidad, como el indicador de autocontención (número de personas ocupadas en el mismo municipio de residencia) y el indicador de número de personas que utilizan el vehículo para ir a trabajar.
- Catastro inmobiliario dependiente del Ministerio de Hacienda y Función Pública, a partir del cual se ha obtenido el número de alturas y viviendas para determinar el consumo energético por tipología de viviendas.

3.3. Índice de dispersión urbana municipal

En este trabajo para el cálculo del índice de dispersión urbana se han utilizado tres variables representativas de las características más importantes de la dispersión urbana: la densidad neta, la compacidad y la magnitud (Tabla 1). Estos indicadores recogen en gran medida el proceso de dispersión urbana. La densidad neta de edificación se obtiene como el número de viviendas dividido por la superficie de suelo urbano mixto. Para la obtención de la superficie de suelo urbano mixto se recurre a las coberturas de casco, ensanche y urbano discontinuo, recogidas en la base de datos del SIOSE. La compacidad vendrá definida como la proporción de superficie urbana discontinua que está ubicada más allá de la envolvente de 500 metros formada por las categorías de centro histórico y ensanche, en relación a la superficie urbana mixta total del municipio. Se ha utilizado un área de influencia de 500 metros para este cálculo, ya que se trata de una medida definida en la directriz 85, punto 2 de la Estrategia Territorial de la Comunitat Valenciana de 2011 para el cálculo de la superficie computable a efectos de la obtención de índices de ocupación de suelo para uso residencial. Finalmente, la magnitud se obtiene como la relación entre la superficie de suelo urbano mixto y la superficie total del término municipal.

Tabla 1: Indicadores para calcular el índice de dispersión urbana. Viv: Nº viviendas por municipio. STM: Superficie término municipal. SUM: Superficie suelo urbano mixto. SUD: Superficie suelo urbano discontinuo. C: Casco urbano. e: Ensanche

Indicador	Fórmula
Densidad neta (Viv/ha)	$\frac{Viv}{SUM}$
Compacidad (%)	$\frac{SUD > 500 \text{ c.e}}{SUM}$
Magnitud (%)	$\frac{SUM}{STM}$

El índice de dispersión urbana se obtendrá como el factor común a los tres indicadores, densidad neta, compacidad y magnitud, definidos anteriormente. El factor común de los tres indicadores se obtiene como la combinación lineal de los mismos, que estadísticamente maximiza la variabilidad. Éste se corresponde con la primera componente principal resultante de aplicar el método de Análisis de Componentes Principales (ACP), puesto que la primera componente principal es un consenso de la máxima varianza compartida entre todas

las variables. El método ACP se basa en la descomposición en vectores y valores propios de la matriz varianzas-covarianzas del conjunto de los tres indicadores iniciales (Abdi and Williams, 2010). El método descompone la matriz X de variables originales en función de las matrices S y A (Ec. 1), de forma que la matriz S contiene las nuevas variables o componentes principales y la matriz A los pesos o contribuciones de la combinación lineal.

$$X = S \cdot A \tag{1}$$

Para aplicar el método ACP se ha utilizado la librería *FactoMineR* (Husson *et al.* 2007) del software estadístico R (R Core Team 2016). El método de ACP se compone de un modelo lineal, y presupone normalidad en las variables de entrada. En nuestro caso, las variables densidad neta, compacidad y magnitud son claramente asimétricas, concentrándose gran cantidad de observaciones en valores bajos (Fig. 1). Para obtener más contraste entre estos valores bajos y, a su vez, obtener variables con distribuciones más normales, es conveniente aplicar alguna transformación a los datos. A las variables *densidad neta* y *compacidad* se les ha aplicado la transformación de la raíz cuadrada, y a la variable *magnitud* una transformación logarítmica. Ambas son transformaciones monótonas que no cambian el orden de los datos (Fig. 2).

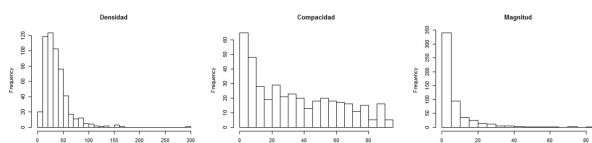


Figura 1: Histogramas sin transformar de las variables de dispersión urbana.

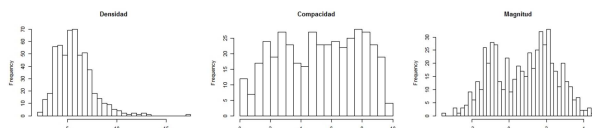


Figura 2: Histogramas transformados de las variables de dispersión urbana.

3.4. Indicadores de sostenibilidad ambiental

Para la caracterización de la sostenibilidad ambiental se han elaborado una serie de indicadores ambientales a nivel municipal. Los indicadores están calculados en función del número de viviendas, puesto que su cálculo respecto a la población conlleva una serie de problemas intrínsecos a la hora de reflejar el dato real, sobre todo en el caso de las segundas residencias o de la población vinculada residente pero no empadronada.

La elección de los indicadores se realiza en base a varios factores: posibilidad de cálculo a nivel municipal, viabilidad de la información, relevancia en el ámbito de la sostenibilidad ambiental y posibilidad de realizar un seguimiento temporal para poder medir el progreso. Algunos de los indicadores se han calculado directamente a partir del dato proporcionado por las fuentes de información, es el caso de los indicadores: *consumo de agua*, *volumen de residuos*, *autocontención* (número de personas ocupadas en el mismo municipio

de residencia), *personas que utilizan el vehículo para ir a trabajar*, *número de vehículos*, *número de puntos de luz*, *número de contenedores* y *longitud de la red de tuberías y de saneamiento*. En otros casos, el indicador se ha obtenido a partir de operaciones de geoprocésamiento integradas en Sistemas de Información Geográfica: es el caso del indicador de *superficie de piscinas* que se ha obtenido a partir de la intersección espacial de la capa vectorial de piscinas del Instituto Cartográfico Valenciano y la capa vectorial de municipios del IGN. De la misma forma, el indicador de *superficie verde* se ha obtenido mediante la intersección de la capa vectorial de municipios del IGN y la cobertura de superficie verde de la capa de usos del suelo del SIOSE. El indicador de *longitud vial urbano* se ha obtenido a partir de la intersección de la capa vectorial de vial urbano de la base de datos *CartoCiudad* y la capa vectorial de municipios del IGN. Para el cálculo del indicador de *volumen de aguas residuales tratadas*, se ha realizado un reparto proporcional del caudal por población puesto que el dato existe a nivel de Estación Depuradora de Aguas Residuales y no a nivel municipal. Finalmente, para el cálculo del *consumo de energía* se ha realizado una estimación a partir de valores tipo dependientes de la tipología de residencia (vivienda unifamiliar y vivienda en bloque) y la zona climática (Tabla 2). La Tabla 3 muestra una relación de todos los indicadores ambientales finalmente observados.

Tabla 2: Consumo energético en Gigajulios (GJ) según zonas climáticas y tipos de viviendas. Fuente: Análisis del consumo energético del sector residencial en España. 2011. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE)

Viviendas	Ud	Atlántico Norte	Continental	Mediterráneo
En Bloque	GJ/Año Vivienda	26,3	35,3	22,1
Unifamiliar	GJ/Año Vivienda	54	70,8	47,7

3.5. Efecto de la dispersión urbana sobre los indicadores de sostenibilidad ambiental

Se formula un modelo estadístico de regresión para cada una de las variables de sostenibilidad, con el fin de obtener su grado de correlación con el índice de dispersión urbana calculado en cada municipio. La formulación del modelo se realiza mediante la metodología de modelización jerárquica Bayesiana (Ntzoufras 2009). Un modelo estadístico de regresión se caracteriza por la definición de una distribución de probabilidad para la variable dependiente, denominada función de verosimilitud, y un regresor que define la relación funcional entre las variables explicativas y la variable dependiente. Se han considerado distribuciones normales para todas las variables independientes Y_j :

$$Y_j \sim \text{Normal}(\mu_j, \sigma_j^2), \quad j = 1, \dots, J \text{ variables...}$$

El regresor funcional entre la media μ_j y los factores explicativos considerados, se compone por la suma de dos componentes, una componente que es una función lineal de la covariable *índice de dispersión urbana* y otra componente que es un efecto aleatorio de estructura espacial (Ec. 2). El efecto aleatorio de estructura espacial recoge el efecto de que los municipios vecinos

puedan tender a parecerse, en forma de suavizado local (Clayton *et al.* 1993):

$$\mu_j(i) = \beta_{0,j} + \beta_{1,j} \cdot Sprawl_j(i) + sp_j(i) \quad (2)$$

Dónde:

$\mu_j(i)$ es la media de la función de verosimilitud de la variable dependiente j en el municipio i .

$\beta_{0,j}$ es la media general del modelo para la variable j .

$\beta_{1,j}$ es el efecto medio del factor explicativo índice de dispersión urbana para la variable j .

$sp_j(i)$ es el efecto espacial de suavizado local en municipio i .

Tabla 3: Relación de indicadores de sostenibilidad ambiental.

Nombre	Descripción	Unidades
Pisci_v	Superficie piscinas	m ² / Vivienda
H20_v	Consumo agua	Litros x Día / Vivienda
Edar_v	Vol. aguas residuales	Litros x Día / Vivienda
Resid_v	Volumen residuos	Kg x Año / Vivienda
Cons_Elect	Consumo eléctrico	Gigajulios x Año / Vivienda
Jard_v	Superficie verde	m ² / Vivienda
Autocont	Autocontención	(%)
TraconAuto	Personas utilizan vehículo para ir a trabajar	(%)
Vial_v	Longitud vial urbano	MI / Vivienda
Vehi_v	Parque vehículos	Nº vehículos / Vivienda
Ptsluz_v	Puntos de luz	Ptos. Luz / Vivienda
Conte_v	Contenedores	(Conten. / Vivienda)*10
Red_v	Red tuberías	MI Tubería / Vivienda
Sanea_v	Red saneamiento	MI Saneamiento / Vivienda

La elección de un modelo estadístico con componente espacial está motivada debido a que las variables dependientes (variables de sostenibilidad ambiental) presentan un marcado carácter espacial con posibles correlaciones debido a posiciones espaciales cercanas. Este efecto espacialmente estructurado se define mediante la distribución *intrinsic conditional autorregresive* (CAR) (Besag *et al.* 1991, Besag and Kooperberg, 1995). Esta distribución implica asociación espacial subyacente entre los valores de la variable sostenibilidad ambiental para un municipio i y el de sus vecinos. Para el desarrollo y aplicación del modelo estadístico de regresión espacial, se ha usado el software estadístico R para el tratamiento y gestión de los datos, y el software WinBUGS (Lunn *et al.* 2000) para la modelización Bayesiana y estimación por un

método de simulación basado en el método de *Markov Chains Monte Carlo* (MCMC) (Geman *et al.* 1984).

Para la selección y adecuación del modelo espacial planteado frente a la adopción de otros modelos más simples, se realiza una comparación entre el modelo espacial, el modelo donde solo se contempla el efecto lineal β_1 de la covariable *Sprawl* y el modelo nulo que solo contempla la constante del modelo. Para medir la capacidad explicativa de los tres modelos y seleccionar el mejor, se usa el estadístico Deviance y DIC (Deviance Information Criterion) (Spiegelhalter *et al.* 2002). Por otro lado, la diagnosis y validación del modelo se lleva a cabo mediante el análisis de la normalidad de los residuos del ajuste.

4. Resultados

4.1. Cálculo del índice de dispersión urbana

El índice de dispersión urbana se corresponde con la primera componente del ACP llevado a cabo sobre los tres indicadores iniciales: densidad neta, compacidad y magnitud. La Tabla 4a muestra las contribuciones de cada una de las variables iniciales sobre las nuevas componentes, resultado de aplicar el ACP. La primera componente está formada principalmente por las variables *densidad neta* y *compacidad* con contribuciones de 0,77 y 0,84 respectivamente y la variable *magnitud* con una aportación de 0,41. La segunda componente tiene la aportación principalmente de la variable *magnitud* con un 0,89 seguida de la variable *densidad neta* con un 0,40. La tercera dimensión es una dimensión más residual, correspondiéndose con un 18% del total de variabilidad y formada principalmente por la contribución de las variables *densidad neta* y *compacidad* (Tabla 4b). La primera dimensión explica un 50 % del total de variabilidad y la segunda dimensión un 30 %.

Tabla 4: Resultados del método ACP. a) Pesos de los indicadores en cada dimensión. b) Porcentaje de varianza.

a)			
Componentes	Dim. 1	Dim. 2	Dim. 3
Densidad neta	0.77	0.40	0.48
Compacidad	0.84	0.07	0.53
Magnitud	0.41	0.89	0.17

b)			
Componentes	Valores Propios	% Varianza	% Varianza Acumulada
Dim 1	1,48	49,58	49,58
Dim 2	0,96	32,05	81,64
Dim 3	0,55	18,35	100,00

La Figura 3 muestra la distribución sobre el conjunto de municipios de la Comunitat Valenciana de los valores del índice de dispersión urbana obtenido, clasificado en cinco clases para su representación en el gráfico. La definición de los intervalos de clase se corresponde con los cuantiles 0%, 20%, 40%, 60%, 80% y 100% de la distribución de frecuencias del índice (Fig. 4). Este índice de dispersión urbana oscila entre -3,53 y 2,89, y

representa la variación de la compacidad a la dispersión, respectivamente. Los valores negativos se corresponden con modelos urbanos más compactos, mientras que los valores positivos muestran modelos urbanos más dispersos. Los municipios de la Comunitat Valenciana con valor negativo en el índice de dispersión urbana suman un total de 301, y los municipios con índice de dispersión urbana positivo ascienden a 241. En la figura 5, se muestra por una parte, los municipios con valor negativo en el índice de dispersión calculado, y estos recogen un 42% de la población total en tan sólo un 21 % de la superficie urbana mixta total. Por otra parte, los municipios con valor positivo en el índice de dispersión, representan un 58% de la población total de la Comunitat Valenciana y para ello ocupan un 79% de la superficie urbana mixta total. Estos datos evidencian claramente, el alto consumo de suelo por parte del crecimiento urbano disperso.

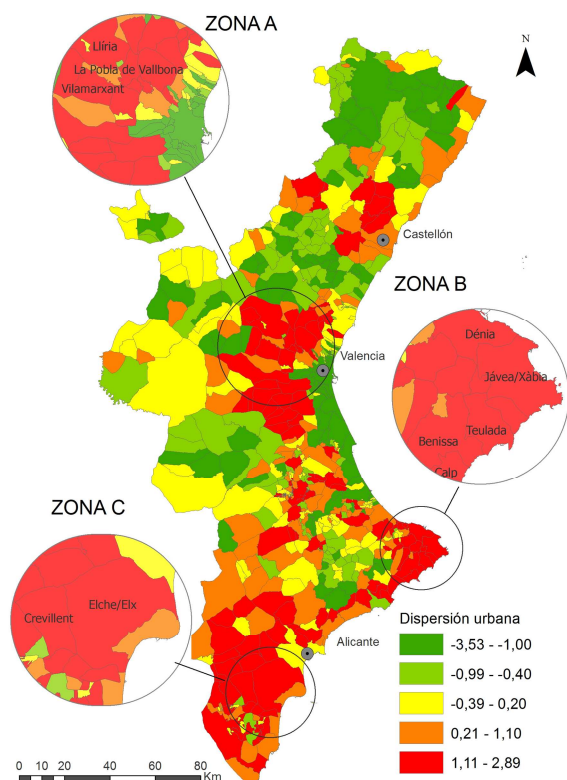


Figura 3: Índice de dispersión urbana de los municipios de la Comunitat Valenciana. Año 2011.

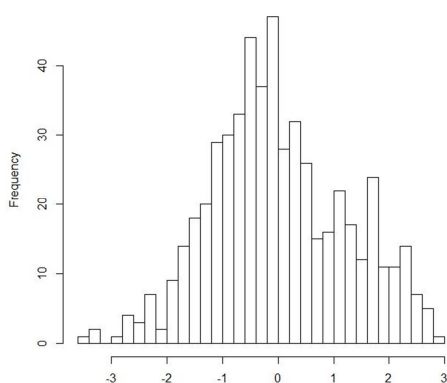


Figura 4: Histograma del índice de dispersión urbana calculado para los municipios de la Comunitat Valenciana.

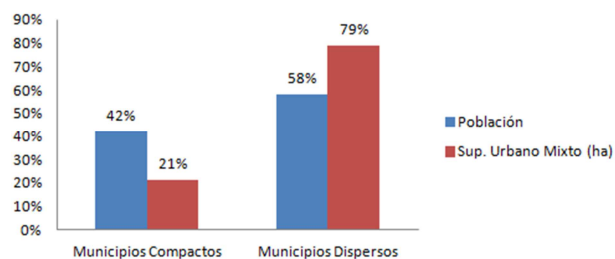


Figura 5: Comparación municipios dispersos y compactos.

4.2. Efectos de la dispersión urbana sobre los indicadores de sostenibilidad ambiental

Una vez calculado el índice de dispersión urbana por municipio y observados los indicadores de sostenibilidad ambiental, ya se está en consideración de calcular el efecto de la dispersión urbana sobre estos indicadores ambientales observados. De la aplicación del modelo de regresión espacial (Ec. 2), se obtienen las estimaciones de los parámetros del modelo (Tabla 5). El parámetro β_1 recoge el efecto lineal medio de la covariable *índice de dispersión urbana* sobre el indicador de sostenibilidad ambiental correspondiente. El parámetro σ_{sp}^2 es la varianza asociada al efecto de suavizado espacial, y el parámetro σ_Y^2 es la varianza residual. Las variables dependientes han sido previamente estandarizadas, por lo cual su variabilidad inicial es 1. Se puede observar en la Tabla 5 como las varianzas residuales después del ajuste del modelo son bastante inferiores a 1, lo que indica cierta capacidad explicativa del modelo. La varianza estimada de efecto aleatorios *sp* es significativa, lo que indica que se ha encontrado un efecto de suavizado espacial importante.

Tabla 5: Estimación de los parámetros del modelo de regresión espacial.

Nombre	$\beta_1 + error$	σ_{sp}^2	σ_Y^2
Pisci_v	0,503 ±0,024	0.84	0.17
H20_v	0,012 ±0,029	0.59	0.46
Edar_v	-0,101 ±0,032	1.16	0.42
Resid_v	0,086 ±0,037	1.43	0.27
Cons_Elect	0,126 ±0,031	0.93	0.40
Jard_v	0,584 ±0,026	0.42	0.20
Autocont	-0,060 ±0,035	0.72	0.46
TraconAuto	0,050 ±0,037	1.11	0.25
Vial_v	0,352 ±0,031	1.12	0.45
Vehi_v	0,021 ±0,024	1.41	0.10
Ptsluz_v	0,035 ±0,033	1.12	0.45
Conte_v	0,068 ±0,034	1.03	0.40
Red_v	0,205 ±0,039	0.86	0.42
Sanea_v	0,001 ±0,033	0.93	0.50

Los efectos β_1 son efectos estandarizados, lo que permite, por un lado, su comparación y, por otro, su interpretación como efectos en proporción de tanto por uno. Los indicadores de sostenibilidad ambiental que más variación presentan al variar un punto la variable de dispersión urbana, son los indicadores de *superficie de*

jardines por vivienda (Jard_v) con un efecto lineal medio del 58,4%, y, por otra parte, el indicador de *superficie de piscinas por vivienda* (Pisci_v) con un efecto lineal medio de un 50,3%. Además, se obtiene un 35,2% de efecto lineal medio sobre el indicador de *longitud de vial por vivienda* (Vial_v), un 20,5% de efecto lineal medio sobre el indicador de *longitud de tuberías por vivienda* (Red_v), y un efecto lineal medio del 12,6% sobre el indicador de consumo eléctrico por vivienda (Cons_Elect).

Presentan un efecto más bajo, los indicadores de *puntos de luz por vivienda* (Ptsluz_v) y *contenedores por vivienda* (Conte_v) con un 3% y 6,8% respectivamente. Destacar también con un efecto bajo, el indicador de *residuos producidos por vivienda y año* (Resid_v) con un 8,6% de efecto lineal medio y el indicador que recoge el *porcentaje de gente que utiliza el coche para ir a trabajar* (TraconAuto) con un 5% de efecto lineal medio producido por la variable de dispersión urbana.

Dos indicadores obtienen efectos negativos, lo que indica que disminuyen a medida que aumenta la dispersión urbana. Se trata del indicador de *autocontención* (Autocont) con un efecto del -6% y del indicador de *caudal de agua tratada por vivienda* (Edar_v) con un -10% de efecto lineal medio. Los indicadores de *longitud de red de saneamiento por vivienda* (Sanea_v), *consumo de agua por vivienda* (H2O_v) y *vehículos por vivienda* (Vehi_v) no presentan ningún efecto significativo.

Los estadísticos *Deviance* y *DIC* obtenidos con el modelo espacial planteado, al ser significativamente menores a otros modelos más simples, un modelo sin el efecto de suavizado espacial y el modelo nulo (Tabla 6), indica que el modelo planteado es mejor modelo y se ajusta mejor a los datos.

Tabla 6: Estadísticos de bondad de ajuste Deviance y DIC para diferentes modelos

	<i>Deviance</i>	<i>DIC</i>
Modelo espacial	4106	10277
Modelo sin estructura espacial	18288	18344
Modelo Nulo	19035	19076

5. Discusión

A la vista del índice de dispersión obtenido para el conjunto de los municipios de la Comunitat Valenciana (Fig. 3), se han podido detectar tres conjuntos de municipios destacados con una dispersión urbana elevada. Por una parte, cabe destacar el grupo de los municipios ubicados en el área metropolitana de Valencia (Fig. 3, zona A). Se trata de municipios ubicados en grandes vías de comunicación y por tanto con buena accesibilidad y próximos a grandes aglomeraciones de población. Estos municipios han absorbido parte de la población de Valencia por el proceso de periurbanización, convirtiéndose en ciudades dormitorio además de ofrecer residencias más tranquilas y en mayor contacto con la naturaleza, caso de Lliria, Villamarxant y Pobla de Vallbona. Este efecto de periurbanización se da también en los municipios del norte de la ciudad de Castellón y en los municipios de alrededor de Alicante. Por otro lado, el segundo grupo

de municipios con valores muy altos de dispersión se corresponde con la zona de las comarcas de la Marina en la provincia de Alicante (Fig. 3, zona B). En estas comarcas se ha producido un incremento de suelo residencial de manera dispersa debido al turismo. Es el caso de municipios como Jávea, Dénia, Calp, Altea, Teulada, Benissa, entre otros. Por último, el tercer grupo se corresponde con municipios del Baix Vinalopó, Elx y Crevillent, en la provincia de Alicante (Fig. 3, zona C). Las causas del crecimiento disperso de este grupo se deben a la existencia de importantes ejes de comunicación como la autopista A-7 y autovía A-79 y a la aparición de tejido urbano discontinuo ligado al turismo.

Por otro lado, la elección de indicadores de sostenibilidad ambiental no ha estado exenta de limitaciones. La mayor limitación ha sido la dificultad para obtener datos ambientales fiables, actualizados y públicos a nivel municipal. Se ha detectado una falta de indicadores ambientales, sobre todo relacionados con el nivel de consumo de recursos, debido a que muchos servicios públicos que se dan en las zonas urbanas están externalizados a empresas adjudicatarias públicas de gestión privada, lo cual dificulta a menudo la obtención del dato, como es el caso del consumo de agua, generación de residuos, consumo de gas, electricidad y transporte; variables éstas muy importantes para determinar la sostenibilidad ambiental de una zona urbana. También, se han detectado diferencias en una misma variable proveniente de diferentes fuentes de información, caso del indicador de *superficie de jardines* (Jard_v) y *vial urbano* (Vial_v). Por último, comentar que muchos indicadores ambientales sólo existen a nivel municipal lo que limita el desarrollo de estudios a menor escala.

El modelo de regresión nos ha permitido cuantificar los efectos de la dispersión urbana sobre los diferentes indicadores de sostenibilidad ambiental elegidos. A pesar de que la variabilidad residual encontrada en el ajuste de algunas de las variables de sostenibilidad ha sido cercana al 50% (Tabla 5), lo que indica que todavía queda una parte significativa de variabilidad que no ha sido recogida por el modelo para estas variables, los modelos formulados y ajustados son representativos y fidedignos ya que el modelo espacial planteado es mejor, en función de los estadísticos Deviance y DIC, que otros modelos (Tabla 6), la falta de independencia de los residuos del ajuste de estas variables es muy ligera y los errores de estimación de los efectos de la variable explicativa son razonables y reducidos (Tabla 5).

Los indicadores con mayor efecto producido por el índice de dispersión urbana, son los indicadores de *superficie de jardines* (Jard_v), *superficie de piscinas* (Pisci_v), *longitud de vial urbano* (Vial_v) y *red de tuberías de agua potable* (Red_v) con un 58%, 50%, 35% y 20% respectivamente. Se trata de indicadores que representan infraestructuras que están claramente ligadas a las construcciones dispersas. En cuanto a indicadores de consumo, destacar los indicadores de *consumo eléctrico* (Cons_Elect) y *generación de residuos* (Resid_v) con un 13 % y 9 % respectivamente. Esto refleja el mayor consumo de energía en las zonas más dispersas, como se evidencia en el trabajo de Bereciartúa (2006). Para algunos de los indicadores de

sostenibilidad elegidos, el efecto del *índice de dispersión urbana* no resulta significativo, como es el caso de los indicadores de *consumo de agua* (H2O_v), *vehículos por vivienda* (Vehi_v) y *red de saneamiento* (Sanea_v). Tanto en el indicador de *consumo de agua* como en el de *red de saneamiento* se esperaba a priori obtener un efecto significativo sin embargo no ha sido así. Cabe mencionar que ambos indicadores provienen de la base de datos EIEL y por tanto la inexistencia de efecto hace pensar en una baja calidad de los datos de estos indicadores.

Los efectos de los indicadores de *autocontención* (Autocont) y del indicador de *gente que utiliza el coche para ir a trabajar* (TraconAuto) presentan un efecto de -6% y 5% respectivamente. Se trata de efectos opuestos y evidencian, aunque de manera débil, el mayor uso del automóvil en los municipios más dispersos y el menor uso en los municipios más compactos. La movilidad es una variable difícil de calcular, teniendo que recurrir la mayoría de veces a encuestas personalizadas para obtener datos de calidad, lo cual hace pensar que no se ha podido recoger todo el efecto que la dispersión urbana produce sobre la movilidad.

Los indicadores de *puntos de luz por vivienda* (Ptsluz) y *contenedores por vivienda* (Conte_v) presentan un efecto bajo, con un 3% y 6,8% respectivamente. Esto puede ser debido, a que se trata de infraestructuras de servicios que atienden principalmente a criterios de población y que la dispersión urbana no influye tanto como la población.

Finalmente, destacar con un efecto en sentido negativo el indicador de *caudal de agua tratada por vivienda* (Edar_v) con un -10% de efecto lineal medio, de tal forma que este indicador disminuye diez puntos porcentuales cuando aumenta un punto la dispersión urbana. Esto evidencia que en las zonas más dispersas no se está tratando toda el agua que se debería debido a que suponen mayores costes y que muchas zonas residenciales se consolidaron a mediados o finales del siglo XX, sin su correspondiente proceso de urbanización, por lo que muchas de ellas no se dotaron con una red de alcantarillado conectada a una Estación Depuradora de Aguas Residuales.

Con todo, en once de los catorce indicadores de sostenibilidad ambiental, ha sido posible establecer una relación directa con el nivel de dispersión urbana y cuantificar el efecto. Tan sólo en el caso de tres

indicadores (H2O_v, Vehi_v, Sanea_v) no se ha encontrado efecto de la dispersión urbana.

6. Conclusiones

La principal dificultad de este tipo de estudios es la obtención del dato, ya sea por dificultad como por fiabilidad. Es necesaria la existencia de iniciativas políticas encaminadas a la recopilación de indicadores ambientales a nivel municipal, como la Agenda 21 que tenía como objeto alcanzar un desarrollo sostenible en el marco ambiental. Se ha tenido que recurrir hasta a ocho bases de datos oficiales diferentes para obtener únicamente catorce indicadores de sostenibilidad ambiental.

Es necesario establecer mecanismos que permitan calcular de manera eficiente y en la menor frecuencia posible, buenos indicadores de sostenibilidad ambiental de cada municipio o de las zonas urbanas.

Es interesante hacer notar que este estudio no pretende contraponer la ciudad dispersa frente a la ciudad compacta, tan solo trata de conocer los efectos de la dispersión urbana sobre el medio ambiente y cuantificarlos con el objeto de poder planificar modelos urbanos más sostenibles.

La consideración de una componente de suavizado espacial en el modelo de regresión planteado para obtener los efectos de la dispersión urbana sobre los indicadores de sostenibilidad ambiental, es un aspecto novedoso en este tipo de estudios, y que ha permitido ajustar modelos más precisos para ajustar cada uno de los indicadores de sostenibilidad. Aún así, la variabilidad residual encontrada ha sido cercana al 50% en algunas de las variables de sostenibilidad. En un futuro trabajo se pretende probar la inclusión de un efecto aleatorio por municipio para intentar modelizar parte de esta variabilidad residual y mejorar incluso más la capacidad explicativa del modelo.

La obtención de los efectos de la dispersión urbana sobre la sostenibilidad ambiental, puede ser una herramienta de planificación urbanística, permitiendo evaluar el modelo urbano futuro planteado por cada municipio en su Plan General de Ordenación Urbana. A partir de esta herramienta se podría simular el crecimiento de las nuevas zonas urbanizadas, recalculando el nivel de dispersión y de esta manera, prever el efecto ambiental resultante.

References

- ABDI, H. and WILLIAMS, J., 2010. *Principal component analysis*. WIREs Computational Statistics **2**(4), pp.433–459, doi:10.1002/wics.101.
- ANGEL, S., PARENT, J. and CIVCO, D., 2007. Urban Sprawl metrics: An analysis of global *urban Expansion using GIS*. ASPRS 2007 Annual Conference, Tampa, Florida. May 7-11, 2007.
- ARRIBAS-BEL D., NIJKAMPY, P. and SCHOLTEN, H., 2011. *Multidimensional urban sprawl in Europe: a self-organizing map approach*. Computers, Environment and Urban Systems **35**(4), pp. 263–275.
- BERECIARTÚA, P.L., 2006. *El crecimiento en baja densidad en Bizkaia. Urban Sprawl*. XVI Congreso de Estudios Vascos: Desarrollo Sostenible-IT. En futuro. Donostia: 2006, pp.147-156.-ISBN-10: 84-8419-022-6; ISBN-13: 978-84-8419-022-6.
- BESAG, J.E., YORK, J.C. and MOLLIÉ, A., 1991. *Bayesian image restoration with two applications in spatial statistics with discussion*. Annals of the Institute of Statistical Mathematics, **43**, pp.671-681.
- BESAG, J.E. and KOOPERBERG, C., 1995. *On conditional and intrinsic autoregressions*. Biometrika, **82**, pp.733–746.

- CATALAN, B., SAURI, D. and SERRA, P., 2008. *Urban sprawl in the Mediterranean? Patterns of growth and change in the Barcelona Metropolitan Region 1993–2000*. *Landscape and Urban Planning*. 2008, **85**, pp. 174-184.
- CLAYTON, D., BERNARDINELLI, L. and MONTOMOLI C., 1993. *Spatial correlation in ecological analysis*. *International Journal of Epidemiology*, **22**, pp. 1193-1202.
- COLANINNO, N., CERDA, J. and ROCA, J., 2011. *Spatial patterns of land use: morphology and demography, in a dynamic evaluation of urban sprawl phenomena along the Spanish Mediterranean coast*. "51st European Congress of the Regional Science Association International", pp. 1-18.
- ENTRENA, F., 2005. *Procesos de periurbanización y cambios en los modelos de ciudad. Un estudio europeo de casos sobre sus causas y consecuencias*. *Papers: revista de sociología*, nº **78**, pp. 59-88.
- FRENKEL, A. and ASHKENAZI, M., 2008. *Measuring urban sprawl: how can we deal with it?* *Environment and Planning B: Planning and Design*. 2008, volume **35**, 99 pp. 56-79. DOI: 10.1068/b32155.
- GIELEN, E., RIUTORT-MAYOL, G., PALENCIA JIMÉNEZ, J.S. and CANTARINO-MARTÍ, I., 2017. *An urban sprawl index based on multivariate and Bayesian factor analysis with application at the municipality level in Valencia*. *Environment And Planning B-Planning & Design* 1 - 27. DOI: 10.1177/2399808317690148.
- GEMAN, S. and GEMAN, D., 1984. *Stochastic relaxation, gibbs distributions, and the bayesian restoration of images*. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*. 1984, **6**(6), pp.721-41.
- HUSSON, F., JOSSE, J., L'E, S. and MAZET, J., 2007. *FactoMineR: Factor Analysis and Data Mining with R*. *R package version 1.04*, URL <http://CRAN.R-project.org/package=FactoMineR>.
- LÓPEZ, D.A., 2013. *La sostenibilidad urbana en la Unión Europea*. M+A. *Revista electrónic@ de Medio Ambiente*. 2013, Volumen 14, número **2**, pp. 38-62.
- LUNN, D.J., THOMAS, A., BEST, N., and SPIEGELHALTER, D., 2000. *WinBUGS a Bayesian modelling framework: concepts, structure, and extensibility*. *Statistics and Computing*, 10:325337.
- MEZZETTI, M. and BILLARI, F.C., 2005. *Bayesian correlated factor analysis of socio-demographic indicators*. *Stat Methods Appt*. 14, pp. 223-241.
- MUÑIZ, I., GARCÍA, M.A. and CALATAYUD, D., 2006. *SPRAWL. Definición, causas y efectos*. *Volumen 6 de Document de treball / Universitat Autònoma de Barcelona. Departament d'economia Aplicada, 2006, 39 pages*.
- OBSERVATORIO DE LA SOSTENIBILIDAD EN ESPAÑA, 2011. *Informe de sostenibilidad en España 2011*. *Observatorio de la sostenibilidad en España*. *Mundiprensa*.
- NTZOUFRAS, I., 2009. *Bayesian Modeling using WinBUGS*. *Wiley*, 520 pages.
- R CORE TEAM, 2016. *R: A language and environment for statistical computing*. *R Foundation for Statistical Computing*, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- RUEDA, S., 2002. *Els costos ambientals dels models urbans dispersos*. *Papers. Regió Metropolitana de Barcelona*, nº **36**, maig 2002, pp. 73-104.
- SPIEGELHALTER D.J., BEST N.G., CARLIN B.P. and VAN DER LINDE, A., 2002. *Bayesian measures of model complexity and fit (with discussion)*. *J. Roy. Statist. Soc. B*, **64**, pp. 583-640.
- ZENG, C.H., SANWEI, H.E. and JIAXING, C., 2014. *Multi-Level and Multi-Dimensional Measuring on Urban Sprawl: A Case Study in Wuhan Metropolitan Area, Central China*. *Sustainability* 2014, **6**, pp. 3571-3598; DOI:103390/su6063571.

VARIABILIDAD DE LA LÍNEA DE COSTA A PARTIR DE IMÁGENES DE SATÉLITE Y SU RELACIÓN CON LA TEXTURA DEL SEDIMENTO

COASTLINE VARIABILITY FROM SATELLITE IMAGERY AND ITS RELATION WITH SEDIMENT TEXTURE

Carlos Cabezas-Rabadán*, Jaime Almonacid-Caballer, Josep E. Pardo-Pascual, Jesús Soriano-González

Grupo de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT), Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n 46022, València, España. carlos.cabezas.rabadan@gmail.com; jaiorca@upvnet.upv.es; jepardo@cgf.upv.es

Abstract:

Beaches are natural environments of great interest for our society. They go through remarkable changes run by key factors that are interconnected according to the literature. A better understanding of these parameters, such as sediment texture and shoreline variability, would be of a great interest for coastal monitoring and planning.

Shorelines of all Landsat 8 (OLI) images available over the course of one year have been obtained for determining the variability that has occurred in different Valencian beaches. Likewise, the relation between shoreline variability and sediment texture has been evaluated, showing that beaches with higher variability over the year have smaller sediment texture, which is also related with gentle slopes, and vice versa.

The methodology allows obtaining the shoreline variability, a key parameter of beach morphodynamics, in a semiautomatic way. The variability allows developing a gross estimate of beach texture.

Key words: Shoreline Detection, Coastline Variability, Beach Sediment, Sediment Texture, Landsat 8, Remote Sensing

Resumen:

Las playas son entornos naturales de enorme interés para nuestra sociedad. Estos espacios están sometidos a grandes cambios regidos por factores clave fuertemente interrelacionados según la literatura. Un mayor conocimiento de estos parámetros, como la textura del sedimento o la variabilidad de la línea de costa de las playas resultaría de gran interés para la monitorización y gestión de la costa.

Se han obtenido las líneas de costa de todas las escenas Landsat 8 (OLI) disponibles a lo largo de un año para, a partir de ellas, determinar la variabilidad de diferentes playas valencianas. Asimismo, se ha evaluado la relación existente entre dicha variabilidad y la textura del sedimento de las playas, mostrando que las playas con mayores cambios en la línea de costa a lo largo del año son aquellas con un tamaño de grano menor, asociado a pendientes más suaves y viceversa.

La metodología seguida incluye la obtención de forma semiautomática de la variabilidad de la línea de costa, un parámetro clave de la morfodinámica costera, y a partir de ella la estimación a grandes rasgos de la textura del sedimento de las playas.

Palabras clave: Detección de la línea de costa, Variabilidad de la línea de costa, Sedimento de playa, Textura del sedimento, Landsat 8, Teledetección

1. Introducción

Las playas son espacios naturales que proporcionan protección frente al oleaje y temporales, representan un importante recurso socioeconómico (Prodger *et al.* 2016), y actúan como soporte físico para los organismos que allí habitan.

Las actuaciones antrópicas en la zona costera generan cambios en el sistema, modifican la distribución y las características del sedimento y en consecuencia alteran la morfología de las playas. La textura del sedimento y la anchura de las playas son factores clave para permitir el mantenimiento de sus funciones. Por tanto, resulta de

gran interés disponer de información actualizada de ambos elementos para conocer el estado de la playa y plantear una gestión adecuada.

Sin embargo, las características sedimentarias, particularmente las texturales, pueden ser muy variables, tanto espacial como temporalmente (Guillén 2000; Prodger *et al.* 2016). Obtener datos actualizados de la textura de los sedimentos de las playas resulta costoso al requerir trabajo de campo y análisis, imposibilitando la monitorización a gran escala.

De hecho, son muchos los estudios ya clásicos que señalan el gran dinamismo que presenta la línea de costa como respuesta a los procesos costeros (Carter

* Corresponding Author: Carlos Cabezas-Rabadán: carlos.cabezas.rabadan@gmail.com

1988). Se presupone una interrelación entre los diferentes elementos morfodinámicos de la playa, como el oleaje incidente (Hansen and Barnard 2009; Reis and Gama 2010), la fuente de suministros del sedimento y la dimensión de los mismos (Carter 1988; Komar 1998; Dean 1991). Asimismo, la relación de la textura con la pendiente de las playas (Dean 1973; Mclean and Kirk 1969, Vellinga 1983,1984), y la morfología (Masselink and Short 1993; Scott *et al.* 2011) ha sido tratada por muchos autores. Dean (1991) desarrolló la teoría de un perfil de equilibrio de playa en relación a su sedimento, respecto a la que Bodge (1992) propuso un modelo de perfil exponencial. A partir de las conclusiones alcanzadas por estos estudios, es de esperar que una pendiente más elevada vaya asociada a un material más grosero y, a su vez, a una menor variabilidad en la posición de la orilla. Por tanto, si la pendiente se relaciona con la textura y el comportamiento de la línea de costa, conviene analizar en qué manera se relacionan estas últimas entre sí, pudiendo llegar a estimar la textura de las arenas de las playas a partir del comportamiento de la línea de costa.

En los últimos años se ha realizado un importante esfuerzo investigador tratando de determinar de forma eficiente la posición de la línea de costa partiendo de imágenes espaciales de resolución media (Foody *et al.* 2005; Muslim *et al.* 2006; Pardo-Pascual *et al.* 2012; Almonacid-Caballer 2014; Sánchez-García *et al.* 2015; García-Rubio *et al.* 2015; Liu *et al.* 2017), permitiendo obtener una enorme cantidad de información con una elevada frecuencia de actualización. El empleo de estos algoritmos permite registrar los cambios en la posición de la línea de costa con una alta frecuencia a lo largo de un año (Almonacid-Caballer *et al.* 2016).

El objetivo de este trabajo es obtener la variabilidad intra-anual de la línea de costa extraída de forma automática a partir de imágenes Landsat y evaluar su relación estadística con el tamaño medio del sedimento en la zona de playa.

Se extraerán automáticamente las líneas de costa de playas de la ciudad de Valencia empleando SHOREX. En ellas se han tomado y analizado texturalmente muestras de arena.

2. Área de estudio

La zona de estudio se encuentra en el Golfo de Valencia, en la costa este de la Península Ibérica (Fig. 1). Incluye las playas de arena localizadas entre la Patacona y el Perelló.

Se trata de una costa micromareal, con una marea astronómica de menos de 20 cm. Sin embargo, el nivel del mar puede cambiar más de 70 cm cuando diferentes factores meteorológicos tienen lugar. De hecho, la máxima variabilidad del nivel del mar registrado desde 1993 al 2013 por la boya del Puerto de Valencia fue de 1.32 metros (REDMAR 2015). El régimen de oleaje se caracteriza por olas bajas, con una altura significativa de oleaje de 0.7 metros de promedio, y unos periodos cortos, con un periodo de pico de ola de 4.2 s, aunque durante las tormentas las olas pueden alcanzar los 5 metros y 15 segundos de periodo (Pardo-Pascual *et al.* 2014).

Esta área tiene una fuerte deriva litoral que genera transporte hacia el sur. No obstante, el fenómeno ha sido alterado por la construcción de estructuras de ingeniería civil, como el puerto de Valencia, que actúan como trampas de sedimento causando una acumulación de sedimentos en su parte norte y la erosión hacia el sur.

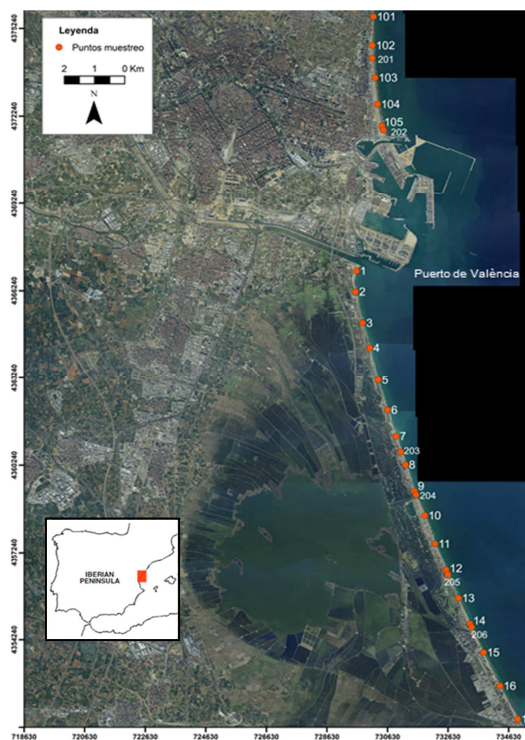


Figura 1: Zona de estudio y puntos de muestreo de sedimento referencia para el cálculo de la variabilidad de la línea de costa (ETRS89 UTM30N).

3. Metodología

Se han definido 28 puntos de referencia en las playas, separados entre sí por una distancia cercana a los 1000 metros, tanto al norte como al sur del puerto de Valencia, intentando cubrir una mayor diversidad de tipos de playa. Estas posiciones se tomarán como referencia a la hora de realizar los análisis granulométricos, así como al estudiar los cambios de posición de la línea de costa.

3.1. Análisis granulométrico

Se tomaron un total de 56 muestras de arena formando transectos perpendiculares a la línea de costa asociados a los 28 puntos de referencia definidos (Fig. 1). Cada transecto incluye 2 muestras: una en el frente de playa (*beach face*), donde se produce el *swash*, y otra en la zona más plana de la playa o estrán (*backbeach*).

Las muestras fueron recogidas en octubre de 2015, 34 entre la desembocadura del río Túria y la Gola del Perelló (puntos 1-17) y 10 al norte del Puerto de Valencia (101-105), complementadas con otras tomadas en abril de 2015 (201-206). Se tomaron siguiendo un protocolo estandarizado (Sanjaume 1985), retirando siempre los 20 cm de sedimento más superficiales. El material se secó después en el laboratorio.

Se tamizaron 50 g de cada una de las muestras siguiendo la escala Wentworth. Con el programa GRADISTAT (Blott and Pye 2001) se obtuvieron los diferentes índices granulométricos asociados a cada muestra, que permiten analizar cambios en el sedimento (Friedman and Sanders 1978; Batman and Dougherty 1997).

3.2. Análisis de las líneas de costa

3.2.1. Extracción de la posición de la línea de costa

La posición de línea de costa se obtiene a partir de imágenes registradas por el sensor OLI del satélite Landsat 8. En concreto se trabaja con la banda 6, que captura la señal entre los 1566 y 1651 nm con una resolución espacial de 30 m. Landsat 8 fue lanzado en febrero de 2013, registrando un mismo lugar potencialmente cada 16 días, siendo posible descargar las imágenes de forma gratuita. Para extraer la línea de costa se ha utilizado el programa SHOREX (Pardo-Pascual *et al.* 2012) que permite obtener automáticamente la línea de costa con precisión sub-píxel partiendo de las bandas del infrarrojo de imágenes Landsat. Esta herramienta detecta el borde agua/tierra gracias a la elevada diferencia en la respuesta radiométrica de ambos medios en las bandas infrarrojas. Ajustando una función polinómica se consigue resolver las limitaciones que imponen las grandes dimensiones de píxel. Dado que el algoritmo se basa en la detección de bordes agua-tierra, y no comparando imágenes, no resulta necesario realizar las correcciones radiométricas que son mayormente lineales. Asimismo, se aplica un proceso de georreferenciación también a escala subpíxel mediante la correlación cruzada en el espectro de Fourier. Así se alcanza una precisión de 5 metros (error medio cuadrático evaluado sobre escolleras fijas). Cada línea es obtenida en formato puntual (una posición cada 7.5 m). Para facilitar la gestión, una vez extraídos y georreferenciados los puntos de la línea de costa se realizó su paso a líneas.

3.2.2. Imágenes procesadas

Para contestar a la hipótesis planteada en el presente trabajo se ha realizado la extracción de las líneas de costa disponibles durante el año 2013. Así se ha dispuesto de 16 líneas de costa que cubren la totalidad de la zona estudiada. Se ha trabajado con los puntos de la línea de costa obtenidos de la banda 6 de Landsat 8, al considerar que es la más estable y que menor error presenta, según ha sido comprobado en trabajos previos (Pardo-Pascual *et al.* 2012; Almonacid-Caballer 2014).

La primera imagen útil disponible que cubre la zona de estudio en el año 2013 es del 16 de abril, y a partir de entonces la zona del Saler fue capturada 16 veces a lo largo de dicho año (Fig. 2). Esta zona dispone de un mayor número de imágenes al producirse el solape de las escenas 199-33 y 198-33.

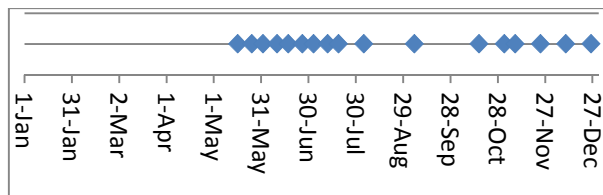


Figura 2: Distribución temporal de las imágenes tomadas por el satélite Landsat 8 sobre el Saler a lo largo del año 2013.

3.2.3. Determinación de la variabilidad de la línea de costa

A priori, cuanto menor sea la pendiente de la playa, mayor será el potencial recorrido de la lámina de agua. Una única línea de costa sólo representará una posición instantánea en alguna zona aleatoria de dicho recorrido. Sin embargo, varias líneas de costa, distribuidas adecuadamente, permitirán parametrizar la extensión de dicha lámina. Esto podrá relacionarse con la pendiente u otro parámetro asociado a ella, como en este caso la textura del sedimento. Para ello se han calculado los cambios de posición de la línea de costa en los mismos tramos costeros durante el año 2013 y, posteriormente, se ha obtenido la variabilidad durante ese periodo.

Se ha optado por trabajar con segmentos costeros de dos longitudes diferentes: 200 y 400 metros en torno a los puntos de referencia en que se ha realizado el análisis sedimentario (Fig. 1). Se trata de averiguar cuál de ellos señala con mayor claridad la relación entre variabilidad y textura.

Para analizar los cambios en la posición de la línea de costa se ha utilizado el programa Digital Shoreline Analysis System (DSAS) desarrollado por el USGS (Thieler *et al.* 2009).

En estas zonas se han generado transectos cada 25 metros, sobre los que se han medido las distancias de las diferentes líneas de costa a una línea de referencia común. Con todas las distancias disponibles para los segmentos de análisis de 200 y 400 metros se obtiene una distancia media por fecha. Por tanto, para cada longitud de análisis se dispone de una posición media por fecha, a partir de las cuales se calcula la desviación y el rango a lo largo del año. Estas variables serán consideradas como representativas de la variabilidad anual.

4. Resultados

4.1. Granulometrías

Las muestras de sedimento, caracterizadas de acuerdo al tamaño medio de sus granos, muestran unos cambios de textura a nivel espacial lógicos a lo largo de los transectos, con un tamaño de sedimento mayor en la rompiente que en el estrán de la playa (Figs. 3 y 4, Tabla 1).

Longitudinalmente, existen diferencias significativas entre las playas localizadas al norte del puerto de Valencia (101-105, 201 y 202), con un tamaño medio de sedimento cercano a los 200 μm para la rompiente y el estrán, y las playas localizadas al sur (1-17, 203-206), donde el sedimento presenta un mayor tamaño. El sedimento más grueso aparece asociado a zonas

erosivas al sur del puerto, donde el sedimento más fino está siendo lavado.

A nivel temporal también se encuentran variaciones destacables, ya que los muestreos realizados durante la primavera (201-206) muestran valores en ocasiones significativamente diferentes a los correspondientes al mes de octubre sobre la misma localización.

Debemos indicar que, en el caso del punto 2, no se disponen de datos para el interior de la playa ya que se trataba de un escollerado artificial.

4.2. Variabilidad de la línea de costa

En la tabla 1 se exponen los valores de granulometría asociados a cada punto de análisis, así como los

valores de variabilidad (desviación típica y rango) de las líneas de costa en los segmentos de 200 y 400 metros.

Los valores de rango y desviación estándar son similares y siguen la misma tendencia al analizar los segmentos de 200 y 400 metros. No obstante, puntualmente la desviación estándar y especialmente el rango resultan sustancialmente mayores para los tramos de 200 metros, tal y como ocurre en los puntos 9 y 101.

Se ha de señalar que, debido a su localización geográfica, no se ha podido calcular la variabilidad de los puntos 1, 105 y 202 sobre un tramo de 400 metros, ya que buena parte del análisis hubiese entrado en entornos artificiales como la desembocadura del Túria y el dique norte del puerto de Valencia respectivamente.

Tabla 1: Valores de tamaño medio del sedimento y de cambio anual de la línea de costa a lo largo del 2013 analizando segmentos de 200 y 400 metros alrededor de los puntos de referencia

	<i>Tamaño medio sedimento (μm)</i>		<i>200 m</i>		<i>400 m</i>	
	<i>Rompiente</i>	<i>Estrán</i>	<i>Rango (m)</i>	<i>Desviación estándar (m)</i>	<i>Rango (m)</i>	<i>Desviación estándar (m)</i>
1	262.8	198.3	24.06	7.31		
2	589.2	944.4	10.90	2.85	9.51	2.65
3	919.6	289.3	8.52	2.29	7.29	1.96
4	874.5	342.4	10.30	2.87	9.22	2.81
5	791.4	624.2	9.03	2.30	8.89	2.07
6	500.9	359.1	10.33	2.37	10.50	2.32
7	687.0	543.0	12.05	2.87	9.39	2.43
8	691.2	300.1	9.64	2.69	11.01	3.07
9	346.9	272.7	21.85	4.56	10.35	2.61
10	720.4	368.0	14.44	2.99	11.77	2.55
11	645.4	315.3	10.66	2.77	11.45	2.76
12	477.8	251.8	12.42	2.96	10.69	3.27
13	366.8	250.0	17.84	4.27	13.70	3.67
14	334.0	238.2	14.09	4.20	13.81	3.86
15	399.0	284.5	20.34	5.47	20.23	5.67
16	354.7	244.2	19.07	4.98	17.36	4.94
17	242.9	210.4	22.43	5.99	20.08	5.36
101	186.6	208.1	17.15	5.09	12.99	3.83
102	246.1	182.6	19.77	5.10	23.04	5.63
103	203.7	181.5	13.57	4.14	15.42	4.13
104	211.9	180.1	14.71	4.33	14.88	4.35
105	182.6	178.4	24.69	7.29		
201	213.8	221.7	22.50	5.77	24.18	5.79
202	166.9	169.0	24.83	6.86		
203	542.0	270.6	10.32	2.66	10.34	2.70
204	319.4	229.3	12.55	3.57	15.36	3.31
205	276.4	303.2	11.74	3.51	12.13	2.99
206	263.0	227.0	15.41	4.34	14.27	3.91

5. Discusión

5.1. Relación entre la variabilidad y la textura del sedimento

La distribución espacial del tamaño de sedimento parece constatar la existencia de una relación entre la textura y las características morfodinámicas de las playas. De este modo, las muestras de sedimento tomadas al norte del puerto de Valencia presentan un tamaño medio más pequeño (Tabla 1). Se trata de playas acumulativas, anchas y de escasa pendiente en las que, según nuestra hipótesis, la variabilidad de la línea de costa debería ser mayor. Por el contrario, al sur del puerto, especialmente en tramos asociados a los puntos 3-8 y 203, el sedimento es más grueso, asociado a procesos erosivos (Pardo-Pascual *et al.* 2016). En estas playas se espera una mayor pendiente y, en consecuencia, una menor variabilidad de la línea de costa.

Para intentar determinar las relaciones existentes entre la variabilidad de la línea de costa y la textura del sedimento partimos de los diferentes parámetros representativos de la textura de las playas y de su variabilidad, que han sido definidos anteriormente (Tabla 1).

Con el propósito de determinar cuáles son los parámetros más representativos de la variabilidad y de la textura del sedimento, así como la amplitud de análisis más adecuada, se relacionan los diferentes parámetros mediante una función lineal (Tabla 2).

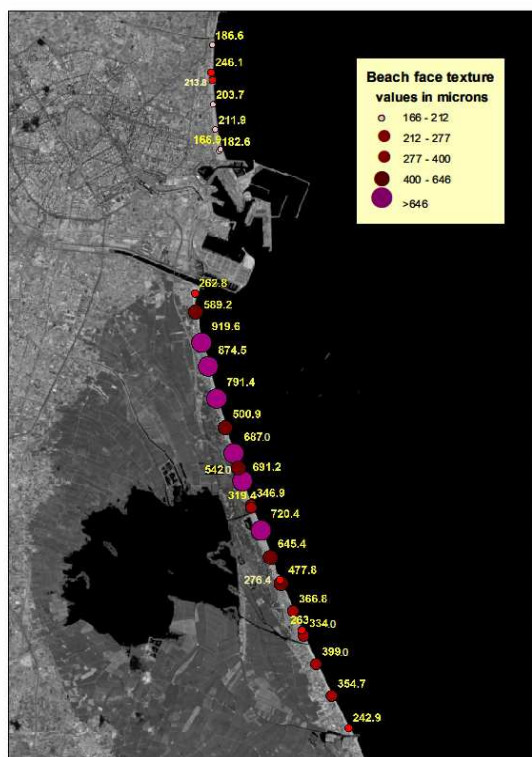


Figura 3: Tamaño medio del sedimento en rompiente (µm).

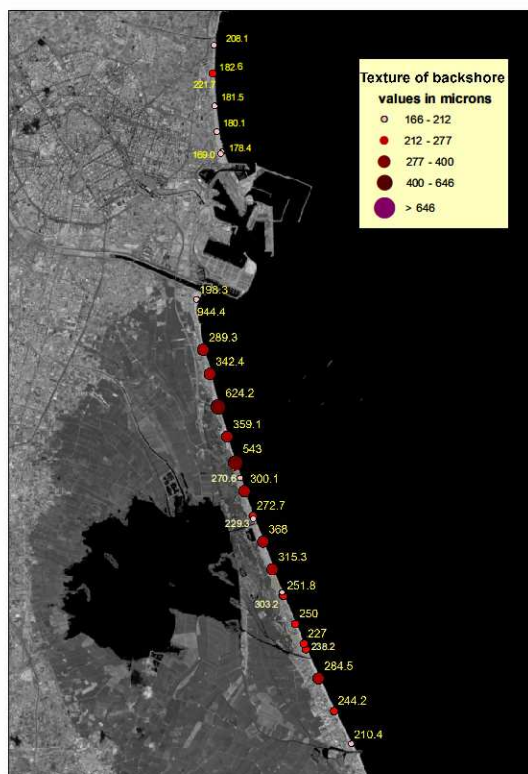


Figura 4: Tamaño medio del sedimento en el estrán (µm).

Tabla 2: Coeficientes de determinación (R2) del ajuste lineal considerando el rango y la desviación estándar en segmentos de 200 y 400 metros, y la textura en las zonas de rompiente y estrán

	Desviación estándar		Rango	
	200 m	400 m	200 m	400 m
Rompiente	0.596	0.500	0.517	0.485
Estrán	0.274	0.248	0.233	0.230

El mejor ajuste aparece al considerar la desviación estándar de una zona de análisis de 200 metros frente al tamaño medio del sedimento de rompiente (Fig. 5). Estas variables y anchura de análisis parecen ser las que permiten apreciar con mayor claridad la relación entre ambos parámetros, y por tanto son las que consideramos en el resto de análisis.

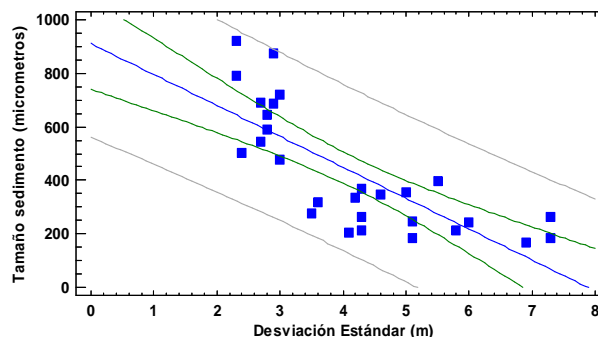


Fig. 5: Ajuste lineal entre el tamaño del sedimento en rompiente, frente a la desviación estándar registrada por la línea de costa, en un entorno de 200 m, junto a los límites de predicción y confianza, con $R^2=0.596$.

Partiendo de estos mismos datos y empleando un ajuste de segundo grado del tipo $Y = (a + b/X)^2$ se alcanza un coeficiente de determinación $R^2=0.75$ (Fig. 6).

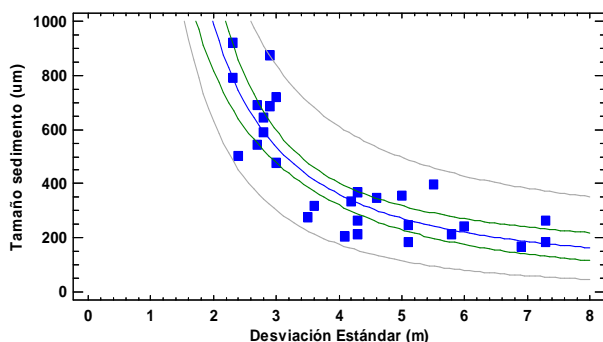


Fig. 6: Ajuste raíz cuadrada de Y X -inversa entre el tamaño medio del sedimento de rompiente y la variabilidad de la línea de costa expresada como desviación estándar, junto a los límites de predicción y confianza, con $R^2=0.748$.

Este análisis corrobora la idea de que sí existe una relación alta e inversa entre la variabilidad y la textura, pese a que presenta un intervalo de predicción bastante amplio.

Según esta regresión, es posible realizar una estimación grosera de la textura de una playa a partir de la variabilidad de las líneas de costa a lo largo de un año.

Sin embargo, analizando gráficamente los datos disponibles se observan comportamientos aparentemente diferenciados entre dos grupos de playas.

Para ilustrarlo planteamos un análisis clúster, en el que se evidencia la presencia de 2 grupos de playas según el tamaño de su sedimento, con una variabilidad muy diferente (Fig 7).

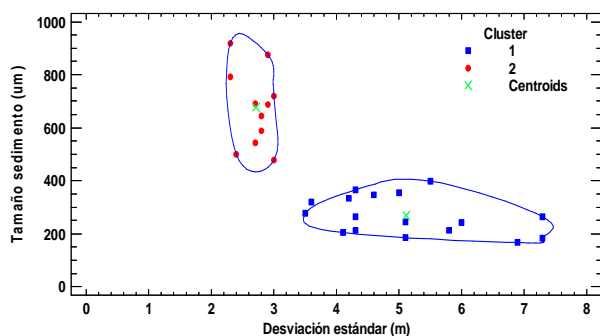


Fig. 7: Análisis de conglomerados con el método de Ward y distancia Euclídea, definiendo 2 clusters y sus centroides.

Aparentemente, a partir de cierto tamaño de sedimento de rompiente, cercano a los 400 μm , la variabilidad de la línea de costa, expresada como desviación estándar, se mantiene entre 2.5 ~ 3 metros, mientras que para un tamaño inferior a 400 μm la desviación es mucho más alta, y va desde los 3.5 a los 7.5 metros.

La existencia de estos 2 grupos queda respaldada estadísticamente al obtener los mismos clusters empleando diferentes métodos de análisis. Asimismo, para complementar este análisis se realizó un análisis discriminante que clasificó adecuadamente todos los datos disponibles, y en el que las variables más útiles

para la clasificación fueron nuevamente la variabilidad en un segmento de 200 metros y el tamaño del sedimento en rompiente.

Ante los datos aportados cabe preguntarse: ¿Existe algún umbral a partir del cual la variabilidad de la playa ya no aumenta a pesar de disminuir la pendiente? ¿Cómo se interrelacionan ambas variables en función de la variable que parece ser su nexa, la pendiente? ¿Hay alguna razón física que explique los grandes incrementos en la variabilidad a partir de cierto tamaño de arena? Nos encontramos ante unas cuestiones a las que no podemos responder con los datos disponibles.

5.2. Factores que influyen en el análisis

5.2.1. Definición de la variabilidad

La metodología empleada parte de la posición de la línea de costa extraída de diferentes imágenes Landsat. Por limitaciones meteorológicas, éstas se encuentran disponibles en un número limitado a lo largo del año y con una distribución no homogénea. Así pues, se dispone de más imágenes en verano que en invierno.

La variabilidad depende de que las líneas instantáneas con que se realiza el cálculo representen adecuadamente el recorrido de la lámina de agua, permitiendo obtener una desviación estándar realmente representativa.

Para este estudio se ha dispuesto de 16 líneas de costa a lo largo de 9 meses. El hecho de que no se encuentren uniformemente distribuidas es una ventaja dado que permite evaluar la variabilidad evitando tendencias temporales, minimizando oleajes y mareas puntuales.

En cualquier caso, la posibilidad de disponer de un mayor número de líneas de costa Landsat, así como la posibilidad de obtenerlas también de imágenes del satélite SENTINEL-2, no hace sino reforzar la utilidad de esta metodología, capaz de gestionar grandes volúmenes de información ambiental.

La obtención de las líneas de costa mediante SHOREX (Pardo-Pascual *et al.* 2012; Almonacid-Caballer 2014) presenta un error estimado de 5 metros (EMC), evaluado sobre tramos fijos de escollera. Esta incertidumbre inherente al método de deducción de la línea de costa introduce ruido en la definición de la orilla, de forma que las variabilidades aquí analizadas presentan un componente independiente a la propia variabilidad experimentada por la línea de costa.

En cuanto a la longitud de análisis, se ha intentado determinar si la relación existente entre la variabilidad y el tamaño del sedimento aparece con mayor claridad en un segmento de 200 o 400 metros de longitud. Un análisis en un entorno más pequeño corre el riesgo de sobreestimar cambios puntuales en la posición de la orilla con poca relación con la pendiente y textura de todo el sector, como los *beach cusps*. Por el contrario, al analizar tramos demasiado largos se desdibujan las diferencias entre zonas con diferente naturaleza.

De hecho, los resultados obtenidos muestran que, para nuestro propósito, resulta más adecuado trabajar con tramos de playa de 200 metros. Esto se debe a que el análisis en un segmento corto se ve menos

condicionado por la mezcla de ambientes heterogéneos, con tamaños de grano y pendientes diferentes.

Para definir la variabilidad se ha propuesto emplear el rango y la desviación estándar intra-anales. A priori, el rango podría representar mejor la variabilidad de la playa. Sin embargo, dado que contamos con un número limitado de líneas de costa, la desviación estándar parece un indicador más robusto que el rango al ser más resistente a medidas extremas, *outliers*, etc.

Los resultados muestran en todos los casos analizados una relación más alta entre la textura y la desviación estándar que frente al rango (Tabla 2). Por todo ello la desviación estándar parece el indicador más adecuado, aun cuando se deberá analizar en el futuro si otros indicadores del cambio de posición presentan una mejor relación con la textura del sedimento.

5.2.2. Definición de la textura

Respecto al empleo del tamaño medio de los componentes del sedimento como parámetro para su caracterización, pese a que es ampliamente utilizado junto al D50, cabe preguntarse si es representativo de la textura del sedimento en una playa. Diferentes estudios apuntan a que una única variable no siempre es representativa de la naturaleza y comportamiento del sedimento (Holland and Elmore 2008; Medina *et al.* 1994), especialmente en las playas con una textura mixta de gravas y arenas en las que el sedimento presenta una distribución bimodal. El empleo de otros parámetros descriptores de la textura, como diferentes percentiles o la clasificación (sorting), podrían aportar información útil para mejorar la comprensión de la relación entre la textura del sedimento, la pendiente, y la variabilidad de las playas.

Respecto a la representatividad espacial del tamaño de los componentes del sedimento, se ha determinado la textura de las playas a partir del tamaño de grano de rompiente. Esto resulta lógico al tratarse, a priori, de la zona más influenciada por el comportamiento marino, a diferencia del estrán u otras áreas más internas de la playa. Sin embargo, este valor responde a la toma de muestras realizada en un único punto y momento, con la consiguiente limitación de su representatividad. Diferentes estudios apuntan a la existencia de una gran variabilidad espacial y temporal en la textura del sedimento (Prodger *et al.* 2016; Gujar *et al.* 2011; Gallagher *et al.* 2011), que lleva a una redistribución de los diferentes tamaños de grano a lo largo de un perfil de playa (Medina *et al.* 1994).

En este caso, hemos comprobado que tal variabilidad temporal existe. De hecho, los puntos de muestreo 201 y 206 muestran un cambio de perfil de verano a invierno, con un cambio sustancial en el tamaño entre ambas estaciones (Tabla 1). Esto puede tener relación con un pequeño temporal previo a la campaña de muestreo, que pudo movilizar la arena presente en la playa (especialmente en rompientes, donde mejores interrelaciones se han encontrado).

Por lo tanto, debemos cuestionarnos en qué medida la granulometría varía a lo largo del año, y hasta qué punto la variabilidad de la línea de costa registrada durante todo un año se puede relacionar con la granulometría de un momento concreto. Las conclusiones alcanzadas por Medina *et al.* (1994) indican que, para un perfil de playa

dentro de una misma unidad fisiográfica, la distribución granulométrica a lo largo del perfil, si bien es cambiante, se mantiene constante en su conjunto (“master grain size distribution”). Esto sugiere que sería razonable relacionar la variabilidad de la posición de la línea de costa, no tanto con los valores granulométricos puntuales (de un único lugar e instante determinado), sino con una muestra representativa de la totalidad del sedimento presente a lo largo de un perfil.

Asimismo, respecto a la variabilidad espacial, en esta zona aparecen cambios en el tamaño de grano asociados a la deriva norte-sur que se da en este sector (Sanjaume and Pardo-Pascual 2007). Este fenómeno natural, unido a la presencia de una serie de obstáculos al transporte longitudinal de origen antrópico, genera situaciones de acumulación y erosión a norte y sur de dichas estructuras respectivamente. Estas actuaciones, así como diferentes realimentaciones artificiales de arena y la eliminación de obras de ingeniería civil, han tenido grandes repercusiones sobre las características del sedimento y pueden haber desdibujado parte de los resultados.

6. Conclusiones

Los resultados muestran una clara relación entre la textura media de la arena en las playas y la variabilidad de su línea de costa, siendo mayor la variabilidad en playas con un menor tamaño de los componentes del sedimento. Esta relación no es lineal y podría estar motivada por la diferente pendiente que presentan las playas.

La variabilidad ha sido descrita como la desviación estándar del conjunto de líneas de costa observadas a lo largo de un año en distintos segmentos de costa. Dichas líneas de costa han sido obtenidas con un EMC previsible de 5 m a partir de escenas Landsat procesadas con SHOREX.

Poder dar un valor numérico a la variabilidad de la línea de costa permite relacionarla con los datos de textura tomados en campo. Dicha relación resulta de gran interés dado que permitiría, a partir de observación satelital, estimar grosso modo un parámetro clave en el comportamiento de las playas como es su textura.

Conocer los cambios en las características del sedimento de forma actualizada serviría para la monitorización y detección temprana de cambios en las playas y procesos erosivos, así como para evaluar la efectividad o efectos negativos de las actuaciones antrópicas realizadas en ellas. Resulta importante destacar que esta metodología abre las puertas a un análisis retrospectivo aprovechando la serie temporal de las plataformas Landsat.

No obstante, también se observa la existencia de un umbral en el tamaño de los granos del sedimento a partir del cual la variabilidad de las playas se ve muy reducida. Probablemente, este umbral en dicho tamaño de sedimento implica un comportamiento morfodinámico diferente.

En los sistemas costeros intervienen multitud de fenómenos. Su influencia a diferentes escalas temporales y espaciales impide una correcta parametrización del sistema. En este sentido, encontrar buenos descriptores y el desarrollo de nuevas

metodologías/algoritmos para medirlos pueden llevar nuevas opciones con que describir de manera útil la dinámica costera.

Agradecimientos

Este proyecto ha sido realizado con la ayuda de la beca FPU15/04501 concedida por el MECD a C. Cabezas, así como con el proyecto RESETOCOAST (CGL2015-69906-R) del programa Retos del MINECO. Los autores agradecen el apoyo de la Oficina Técnica Devesa-Albufera.

References

- ALMONACID-CABALLER, J., SÁNCHEZ-GARCÍA, E., PARDO-PASCUAL, J.E., BALAGUER-BESER, A.A., and PALOMAR-VÁZQUEZ, J., 2016. Evaluation of annual mean shoreline position deduced from Landsat imagery as a mid-term coastal evolution indicator. *Marine Geology*, **372**, pp. 79–88. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2015.12.015>.
- ALMONACID-CABALLER, J., 2014. *Tesis: Detección subpíxel de la línea de costa*. Universitat Politècnica de València.
- BATMAN, S., and DOUGHERTY, E.R., 1997. Size distributions for multivariate morphological granulometries. *Optical Engineering*, **36**(5), pp.1518–1529. <https://doi.org/10.1117/1.601340>.
- BLOTT, S. J., and PYE, K., 2001. Gradistat: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, **26**(11), pp. 1237–1248. <https://doi.org/10.1002/esp.261>.
- BODGE, K.R., 1992. Representing Equilibrium Beach Profiles with an Exponential Expression. *Journal of Coastal Research*, **8**(1), pp. 47–55. Retrieved from <http://journals.fcla.edu/jcr/article/viewFile/78654/76055>.
- CARTER, B., 1988. Coastal environments : an introduction to the physical, ecological and cultural systems of coastlines.
- DEAN, R., 1973. Heuristic models of sand transport in the surf zone. Firt Australian Conference on Coastal Engineering.
- DEAN, R., 1991. Equilibrium beach profiles: characteristics and applications. *Journal of Coastal Research*.
- FOODY, G.M., MUSLIM, A.M., and ATKINSON, P.M., 2005. Super-resolution mapping of the waterline from remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, **26**:24, pp. 5381–5392. <https://doi.org/10.1080/01431160500213292>.
- FRIEDMAN, G. and SANDERS, 1978. Principles of sedimentology. John Wiley & Son.
- GARCÍA-RUBIO, G., HUNTLEY, D., and RUSSELL, P., 2015. Evaluating shoreline identification using optical satellite images. *Marine Geology*, **359**, pp. 96–105. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.11.002>.
- GALLAGHER, E.L., MACMAHAN, J., RENIERS, A.J.H.M., BROWN, J., and THORNTON, E.B., 2011. Grain size variability on a rip-channeled beach. *Marine Geology*, **287**(1), pp. 43–53. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.06.010>.
- GUILLÉN, J., 2000. Variabilidad del tamaño del sedimento en la zona litoral, *Geomorfología Litoral. Procesos activos* (J.R. Andrés y F.J. Gracia, Editores), pp. 45-66, Instituto Tecnológico GeoMinero de España, Madrid.
- GUJAR, A.R., GANESAN, P., IYER, S.D., GAONKAR, S.S., AMBRE, N.V, LOVESON, V.J., and MISLANKAR P.G., 2011. Influence of morphodynamic variability over seasonal beach sediments and its probable effect on coastal development. *Ocean and Coastal Management*, **54**(7), pp. 514–523. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2011.03.007>.
- HANSEN, J.E., and BARNARD, P.L., 2010. Sub-weekly to interannual variability of a high-energy shoreline. *Coastal Engineering*, **57**(11–12), pp. 959–972. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.05.011>.
- HOLLAND, K.T., and ELMORE, P.A., 2008. A review of heterogeneous sediments in coastal environments. *Earth-Science Reviews*, **89**(3–4), pp. 116–134. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.03.003>.
- KOMAR, P., 1998. Beach processes and sedimentation. Prentice Hall.
- LIU, Q., TRINDER, J., and TURNER, I.L., 2017. Automatic super-resolution shoreline change monitoring using Landsat archival data: a case study at Narrabeen–Collaroy Beach, Australia. *Journal of Applied Remote Sensing*, **11**(1), 16036. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.11.016036>.
- MASSELINK, G., and SHORT, A.D., 1993. The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model. *Journal of Coastal Research*, **9**(3), pp. 785–800. <https://doi.org/10.2307/4298129>.
- MCLEAN, R., and KIRK, R., 1969. Relationships between grain size, size-sorting, and foreshore slope on mixed sand-shingle beaches. *New Zealand Journal of Geology and*.
- MEDINA, R., LOSADA, M.A., LOSADA, I.J., and VIDAL, C. 1994. Temporal and spatial relationship between sediment grain size and beach profile. *Marine Geol.*, **118**(1963), pp. 195–206.
- MUSLIM, A., FOODY, G., and ATKINSON, P., 2006. Localized soft classification for super-resolution mapping of the shoreline. *International Journal of*. Retrieved from <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431160500396741>.

- PARDO-PASCUAL, J.E., ALMONACID-CABALLER, J., CABEZAS-RABADÁN, C., and SORIANO-GONZÁLEZ, J., 2016. *Caracterización de la textura de los sedimentos y evolución de la línea de costa desde Pinedo hasta la gola del Perelló mediante imágenes Landsat (1984-2014)*. València.
- PARDO-PASCUAL, J.E., ALMONACID-CABALLER, J., RUIZ, L.A., PALOMAR-VAZQUEZ, J., and RODRIGO-ALEMANY, R., 2014. Evaluation of storm impact on sandy beaches of the Gulf of Valencia using Landsat imagery series. *Geomorphology*, **214**, pp. 388–401. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.02.020>.
- PARDO-PASCUAL, J.E., ALMONACID-CABALLER, J., RUIZ, L.A., and PALOMAR-VÁZQUEZ, J., 2012. Automatic extraction of shorelines from Landsat TM and ETM+ multi-temporal images with subpixel precision. *Remote Sensing of Environment*, **123**, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.024>.
- PRODGER, S., RUSSELL, P., DAVIDSON, M., MILES, J., and SCOTT, T., 2016. Understanding and predicting the temporal variability of sediment grain size characteristics on high-energy beaches. *Marine Geology*, **376**, pp. 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2016.04.003>.
- REDMAR (Red de Mareógrafos de Puertos del Estado), 2015. Resumen de los parámetros relacionados con el nivel delmar y la marea que afectan a las condiciones de diseño y explotación portuaria. Puerto de Valencia, Dirección Técnica Puertos del Estado (Disponible en <http://www.puertos.es/es-es>).
- REIS, A. H., and GAMA, C., 2010. Sand size versus beachface slope - An explanation based on the Constructal Law. *Geomorphology*, **114**(3), pp. 276–283. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.07.008>.
- SÁNCHEZ-GARCÍA, E., PARDO-PASCUAL, J.E., BALAGUER-BESER, A., and ALMONACID-CABALLER, J., 2015. Analysis of the shoreline position extracted from landsat TM and ETM+ imagery. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, Vol. **40**, pp. 991–998. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-991-2015>.
- SANJAUME, E., 1985. Las costas valencianas: sedimentología y morfología. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=163487>.
- SANJAUME, E. and PARDO-PASCUAL, J.E., 2007. Cambios de tendencias recientes en la evolución costera del golfo de Valencia: análisis espaciales y sedimentológicos. “Las nuevas técnicas de información geográfica al servicio de la gestión de zonas costeras: Análisis de la evolución de playas y dunas”. 5–11.
- SCOTT, T., MASSELINK, G. and RUSSELL, P., 2011. Morphodynamic characteristics and classification of beaches in England and Wales. *Marine Geology*, **286**(1), 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.04.004>.
- THIELER, E., HIMMELSTOSS, E., ZICHICHI, J. and ERGUL, A., 2009. The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0-an ArcGIS extension for calculating shoreline change. Retrieved from <https://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr20081278>.
- VELLINGA, P., 1983. Predictive Computational for Beach and Dune Erosion During Storm Surges. *Coastal Structures*: 806–819.
- VELLINGA, P., 1984. A tentative description of a universal erosion profile for sandy beaches and rock beaches. *Coastal Engineering*, **8**(2), pp. 177–188.
- WENTWORTH, C., 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The Journal of Geology*.

MATLAB-BASED TOOL FOR DRAINAGE NETWORK ORDERING BY HORTON AND HACK HIERARCHIES

HERRAMIENTA DISEÑADA EN MATLAB PARA LA ORDENACIÓN DE REDES DE DRENAJE POR LAS JERARQUÍAS DE HORTON Y HACK

Candela Pastor-Martín^{a,*}, Loreto Antón^a, Carlos Fernández-González^b

^a Dpto. de Ciencias Analíticas, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), Senda del Rey 9, 20840 Madrid, Spain. cpastor@pas.uned.es; lanton@ccia.uned.es

^b Dpto. de Física Interdisciplinar, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), Senda del Rey 9, 20840 Madrid, Spain. cafernan@ccia.uned.es

Abstract:

This work presents a new MATLAB-based tool designed for network extraction and drainage network orderings by Horton and Hack hierarchies. Most GIS software offers only topological network orderings, based on joining segments, such as Strahler or Shreve, providing segments between junctions but not entire streams. Differently, Hack and Horton orderings allow organizing a drainage network in a hierarchy, identifying the parent segment over the child segment, giving as a result a drainage network where the value of a river remains unchanged from the mouth upstream to the headwater, allowing extracting entire streams. Horton and Hack hierarchies ease the interpretation of a drainage system compared to Strahler and Shreve. To extract the drainage network, this tool uses TopoToolbox 2 functions, to compute the prior steps of the channel network extraction and channel network ordering processes, and develops new functions. To sort a network, this tool allows selecting the parameter that defines the network hierarchy. This parameter is the so-called hierarchy attribute and could be the distance upstream, which refers to the distance between a junction upstream to the headwater, or the upstream accumulation, which is the accumulation at the junction. In addition to these mandatory parameters, the tool offers a set of optional parameters which turns it into a competitive alternative to generate a highly tailored ordered drainage network. The continuous channel network provided by the tool facilitates the use of other multiple applications for landscape analysis, such as the extraction longitudinal profiles or basin analysis through geomorphic indices.

Key words: Hydrology, Fluvial hierarchies, Drainage network, Horton, Hack, MATLAB

Resumen:

Este trabajo presenta una nueva herramienta diseñada en MATLAB para la extracción y ordenación de redes de drenaje por las jerarquías de Horton y Hack. La mayoría de software GIS ofrece sólo ordenaciones topológicas de redes, basadas en la unión de segmentos, como las ordenaciones de Strahler o Shreve, que proveen segmentos entre puntos de confluencia pero no canales completos. En cambio, las ordenaciones de Hack y Horton permiten organizar una red de drenaje en una jerarquía, identificando el segmento primario sobre el segmento secundario, dando como resultado una red de drenaje donde el valor de un río permanece inalterado desde la desembocadura aguas arriba hasta la cabecera. Las ordenaciones de Horton y Hack facilitan la interpretación de un sistema de drenaje comparado con Strahler y Shreve. Para extraer la red de drenaje, esta herramienta utiliza funciones de TopoToolbox 2 para calcular los pasos previos de los procesos de extracción y ordenación de la red y además desarrolla nuevas funciones. Para ordenar la red, esta herramienta permite seleccionar el parámetro que define la jerarquía de la red. Este parámetro es el llamado atributo de jerarquía que puede ser la distancia aguas arriba, que se refiere a la distancia desde el punto de confluencia a la cabecera, o la acumulación ascendente, que es la acumulación en el punto de confluencia. Además de estos parámetros obligatorios, la herramienta ofrece un conjunto de parámetros opcionales que la convierten en una alternativa competitiva para generar una red de drenaje ordenada personalizada. Esta herramienta permite generar de una red fluvial continua que es requerida en otras múltiples aplicaciones como puede ser para la extracción perfiles longitudinales y/o el análisis de cuencas a través de índices geomórficos.

Palabras clave: Hidrología, Jerarquías fluviales, Red de drenaje, Horton, Hack, MATLAB

1. Introduction

In the last three decades advances in modelling Earth's surface have been made thanks to the development of algorithms and computer simulation models (Refice *et al.* 2012). Land surface analysis, hydrology and

hydrogeology assessment, drainage network analysis, etc., they all have had an extensive development since the 1980s (O'Callaghan and Mark 1984; Jenson 1985) and keep developing today. Regarding hydrology analysis, many flow-related algorithms have been developed, such as flow direction (Lindsay 2003;

* Corresponding Author: Candela Pastor-Martín, cpastor@pas.uned.es

O'Callaghan and Mark 1984), flow accumulation, flow length, stream order, among others.

Most of the mentioned flow-related algorithms are implemented in GIS software. Although, many of these flow-related algorithms have also been developed for non-spatial software, such as MATLAB (MathWorks 2012) or Octave (Eaton *et al.* 2014). These software allow non-GIS users to perform different drainage analysis in a non-spatial environment.

Nowadays, there are numerous geomorphologic indices and other quantitative analysis based on the fluvial network which provide information on landscape evolution (Kirby and Whipple 2001; Tucker and Hancock 2010; Anton *et al.* 2015; Antón *et al.* 2012; Whipple *et al.* 2003). Based on streams characterization, those analysis help to understand fluvial systems and landscape responses to external drivers such as climate, tectonics, human actions, etc. (Font *et al.* 2010; Shugar *et al.* 2017; Pedrera *et al.* 2009; Antón *et al.* 2014, Mather and Hartley 2006; Anton and Munoz 2007).

Although numerous authors developed software to facilitate fluvial extraction and indices calculation (Schwanghart and Kuhn 2010; Pérez-Peña *et al.* 2009) attaining a suitable channel network to tackle the automatic calculation of indices is still a quite time consuming process as most software extracts independent channel stretches instead of a continuous channel from headwater to mouth. While an entire channel is required to tackle stream long profile analysis (Jiménez-Cantizano *et al.* 2017) and most of geomorphic indices.

The aim of this paper is to present a new MATLAB-based tool for channel network ordering by Horton and Gravelius/Hack hierarchies. This tool works with MATLAB-based TopoToolbox 2 toolkit (Schwanghart and Kuhn 2010; Schwanghart and Scherler 2014) to calculate the flow direction, flow accumulation and flow length matrices, which are the prior flow maps required in the drainage network extraction process.

2. Flow-related concepts

A Digital Elevation Model (DEM) grid is a rectangular matrix of floating or integer values representing elevations of the terrain above a common base level. Each matrix element is a cell. Grids are common because they are simple, and because data is readily available in this form (Toma *et al.* 2001). Flow-related maps are normally derived from the DEM. Flow-related matrices are the following: Flow direction, normally computed with the Single Flow Direction (SFD) or Deterministic-8 (D8) algorithm, introduced by O'Callaghan (1984). SFD assigns flow from each cell to one of its eight neighbors, either adjacent or diagonal, in the direction with steepest downward slope. Another flow-related matrix is the flow accumulation, which quantifies the amount of water that flows through each cell of the terrain, if water was poured uniformly onto the terrain (Moore *et al.* 1991). Most of flow accumulation algorithms depend on flow directions. Another flow-related matrix is flow length. It can be computed upstream, which is the length from each cell up to the headwaters, or downstream, which refers to the length down to the confluence or mouth of the basin. These

matrices are the previous steps in the process to sort a channel network.

Normally a channel network can be idealized as a planar tree where a channel is a branch and the master channel is the tree trunk. The furthest point downstream is the channel network outlet or mouth. Points furthest upstream, are called stream heads or headwaters. The points where two channels join are called junctions or confluences.

2.1. Drainage network ordering

Drainage network ordering refers to the method to sort a channel network. There are multiple methods to order a drainage network. The most common ordering methods included in conventional GIS software are the Strahler method (Fig. 1.A) and Shreve method (Fig. 1.B). In addition to these sorting hierarchies, there are other network orderings, such as: Original Horton hierarchy (1945) (Fig. 1.C) and normal stream hierarchy proposed by Gravelius (1914) also known as Hack's main streams (1957) (Fig. 1.D).

Gravelius proposed one of the first attempts to classify drainage networks on the basis of branching (Gravelius 1914; Hack 1957). In this system, the main stream is designated as order 1 and smaller tributary streams are designated with increasingly higher orders, from the stream confluence upstream to the headwaters. When a parent channel of order n meets a junction, ascribes order $n + 1$ to the joining tributary (Fig. 1.D). Horton, in the inverse of which was Gravelius hierarchy, considering that the main stream should be the one with the highest order and that unbranched finger-tip tributaries should always be designated by the same ordinal, used a system where unbranched finger-tip tributaries are always designated as order 1. Tributaries of second order receive only tributaries of first order, third order tributaries receive tributaries of second order but may also receive first order tributaries, and so on (Horton 1945) (Fig. 1.C). To determine which the parent segment is and which is the child segment in a junction, Horton considers that the stream that forms the greatest angle with the parent is of lower order. If both joining streams form the same angle with the parent, the shorter stream is taken as of the lower order.

Strahler system slightly modifies Horton hierarchy, which fixes the ambiguity of Horton's ordering. Strahler remains to an idealized topological model, where the stream order changes from the basin mouth point up to the stream head (Strahler 1957). In Strahler hierarchy, the starting points are the headwaters. The smallest finger-tip tributaries are designated with order 1. When two segments of the same order n join, a segment of order $n + 1$ is formed. When two segments of different order meet, they form a segment of maximum order of both (Fig. 1.A). The master stream is therefore the segment of highest order. Shreve hierarchy is similar to Strahler hierarchy. Finger-tip streams are of order 1. When two segments join, the resultant segment downstream order is the sum of the segments' order joining. Hence, the magnitude of a segment is equal to the total number of stream heads ultimately tributary to it (Shreve 1967) (Fig. 1.B). Both hierarchies, Strahler (1957) and Shreve (1967) are purely topological hierarchies, where the interconnected segments between junctions do not involve lengths, shapes,

accumulation rates or orientations of the segments comprising the channel network.

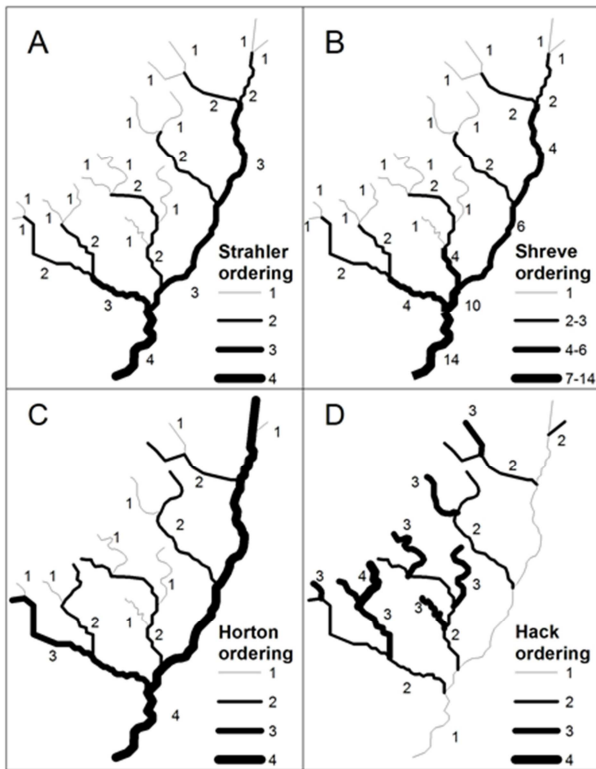


Figure 1: Stream network orderings: (A) Strahler (Strahler 1957), (B) Shreve (Shreve 1967), (C) Horton (Horton 1945), (D) Hack (Hack 1957).

3. Methodology

3.1. Tool-related concepts

In this tool, the furthest point downstream of the channel network is called outlet. The points where two channels join are called junctions and the last point of a channel before joining in a confluence with another channel is called pour point.

3.2. Parameters

The tool requires setting a set of input parameters values prior to its execution. They are of two types: mandatory and optional. The mandatory parameters should be fulfilled to execute the tool, otherwise the tool will show up an error message. Mandatory parameters are the following: name of the DEM file in ASCII format; the sorting hierarchy: Horton or Hack; and the hierarchy attribute which defines the hierarchy of a segment over another when two or more segments converge in a confluence: upstream accumulation or upstream distance.

Upstream accumulation represents the amount of water a tributary carries along its route from the headwater down to the junction. Upstream distance represents the cumulative length from the headwater to the junction. The tool gives the greatest order to the branch with higher hierarchy attribute value in the pour point. If two channels have same hierarchy attribute value, elevation is compared as a second attribute. The branch with highest elevation in the pour point will be given the

highest order (Jasiewicz and Metz 2011). Upstream accumulation and upstream length replace Horton's previous idea to give the greatest order to the branch that has a smaller angle with respect to the parent branch (Horton 1945). This idea was discarded because this parameter leads to hierarchy systems that do not represent realistic drainage structure (Ai 2007).

Added to the set of mandatory parameters, there is also the set of optional parameters. Optional parameters can be used to obtain a more customized sorted channel network. If these parameters are left empty, a default value for each parameter will be set. These parameters are the following: The maximum tributary order, which is the 'ith' order up to which the channel network will be sorted. If user sets a value, only tributaries of equal or lower order to the value set will be sorted. Otherwise, if no value is set, the entire drainage network will be sorted.

Another optional parameter is the minimum drainage area, which refers to the minimum drainage area of a channel to be sorted. This parameter should be dimensioned in relation to the DEM size and spatial resolution. If user sets a value, only channels with equal or higher drainage area than the value set will be sorted. The rest of the cells will appear as no-data. In contrast, if this parameter is left as empty, the default value will be set to the 0.01% of the DEM watershed area in square meters. The last two optional parameters are the name for the resultant sorted channel network in ASCII format, and the name for the resultant ASCII file with the pour points. Both names have to be written with the extension '.asc' or '.txt' at the end of the name. If no names are given, the resultant names will be built by adding to the DEM name, the values set in the parameters joined by an underscore.

3.3. Extraction and sorting processes

The process of this tool is shown in Figure 2 workflow which illustrates the process on a whole (Fig. 2.A) and the logical scheme of *find_next_river_cell* and *find_junctions* functions (Fig. 2.B).

The extraction of the drainage network is upstream. The initial point is the mouth of the basin. From that point, the drainage network skeleton is delineated upstream, finding junctions until reaching the head of the channels.

To initially generate the flow direction, flow accumulation, upstream distance and Strahler matrices, functions from the TopoToolbox 2 (Schwanghart and Scherler 2014) are used in *build_streams_map* function. In *build_streams_map* function the DEM is converted to GRIDObj format. A process of filling is applied to the DEM matrix to fill sinks or atopic peaks, using *fillsinks* function on the GRIDObj variable. Negative values and zeros are replaced with 'NaN' values. Flow direction is then computed applying *FLOWobj* function on the filled DEM, selecting 'preprocess' and 'fill' as options. Flow accumulation matrix is computed applying *flowacc* function on the flow direction object (FD). Finally, the upstream length matrix is computed applying *flowdistance* function on a stream object (STREAMObj). If Horton hierarchy is selected, Strahler downstream matrix is also computed within these prior steps, using *streamorder* function.

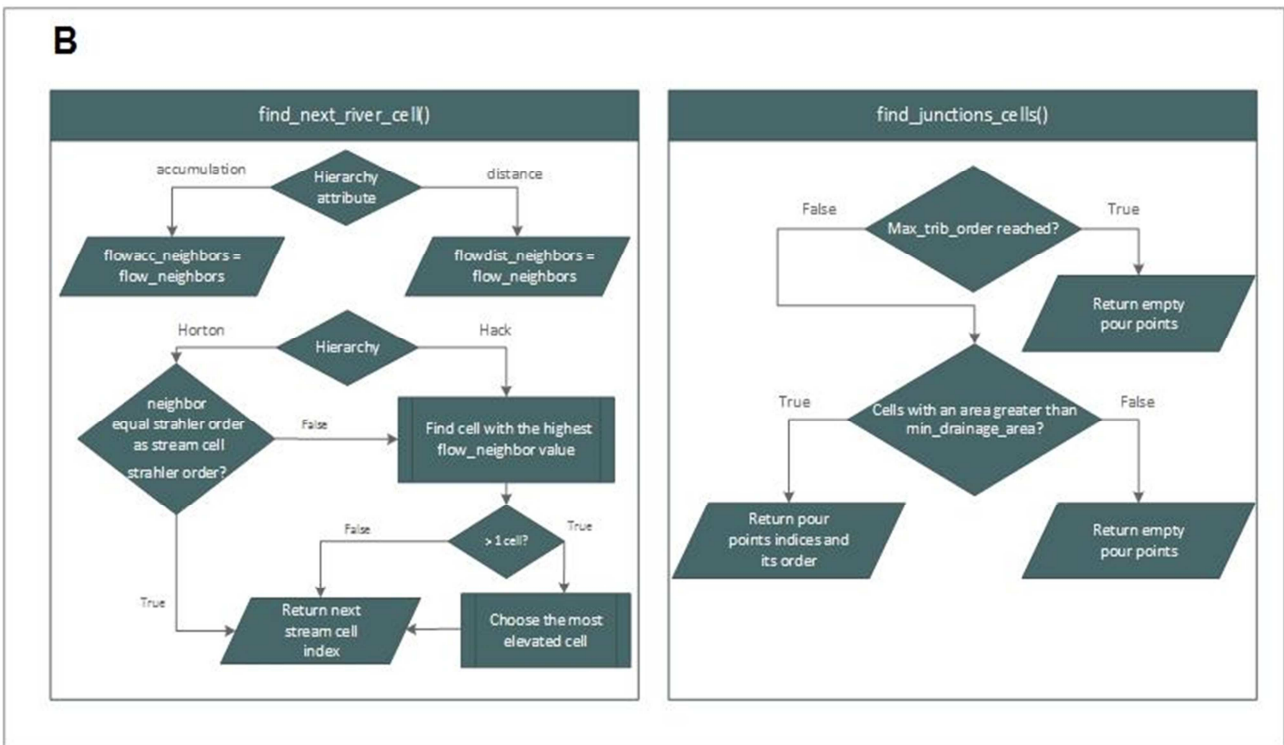
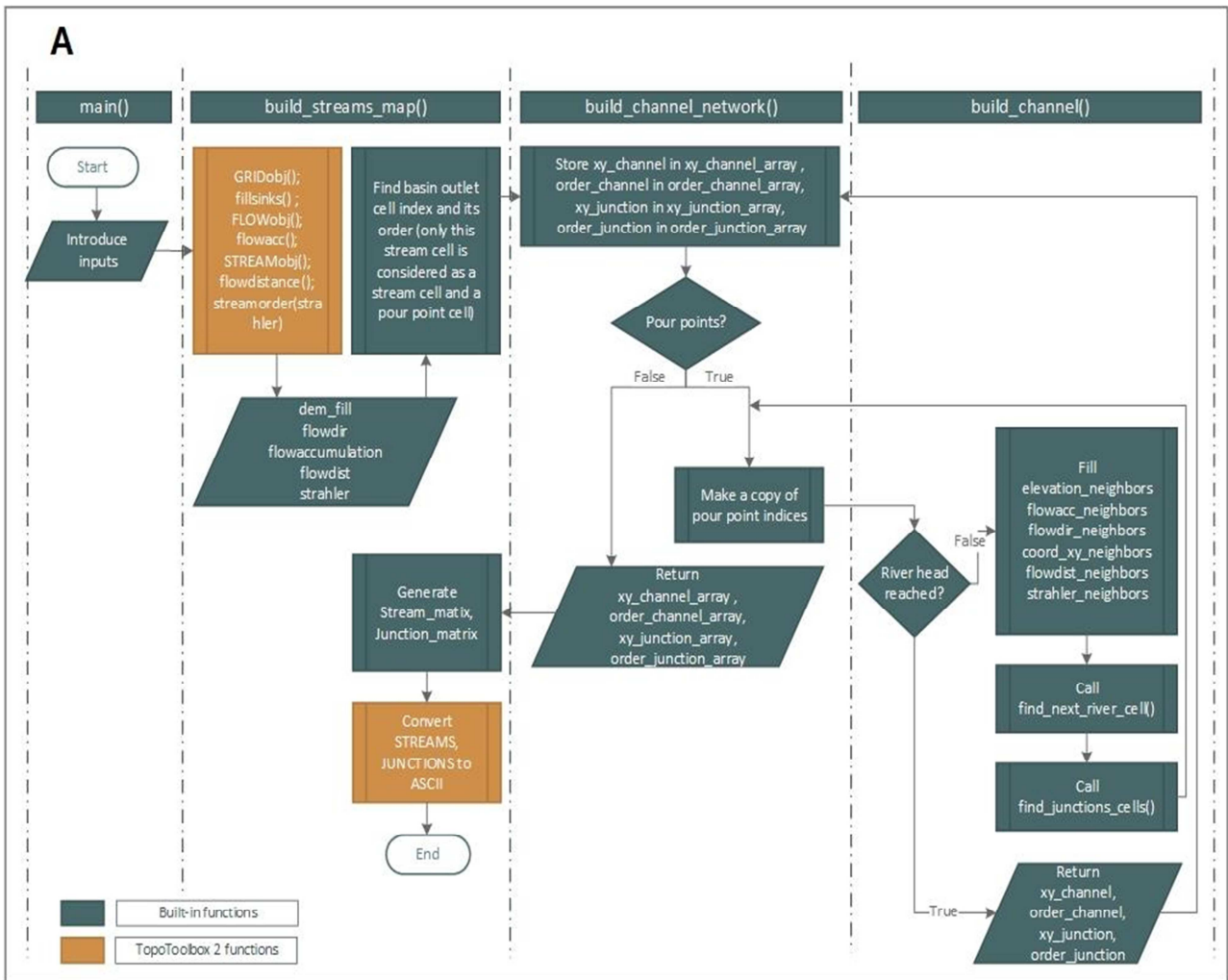


Figure 2: Workflow of the processes for the extraction and ordering by Horton or Hack hierarchies: A) Complete workflow; B) Schemas of find_next_river_cell and find_junctions functions.

Once all flow-related matrices have been computed, two rows and columns with 'NaN' values are added to all of the matrices in order to analyze the edge cells.

The initial point from which the channel network skeleton will be delineated is the watershed outlet. In the *build_channel_network* function four empty arrays are created to store channel network information while it is extracted. The *xy_channel_array* variable, stores the indices of a channel; *order_channel_array* variable stores the hierarchical order of each extracted cell. For an index in the *xy_channel_array*, its order value will be the one that is in the same index in the *order_channel_array*. Similarly, *xy_junction_array* stores the indices of the pour points cells and their corresponding orders are stored in the *order_junction_array*.

The *build_channel* function extracts a channel. The first channel cell to assess is the basin mouth. To assess a channel cell, a 3x3 auxiliary window matrix is created around it. Six empty arrays are created, and each array is filled with neighboring cells values of the following matrices: elevation, flow direction, flow accumulation, flow distance, Strahler (only for Horton hierarchy) and also neighbours' linear indices. All these variables are described in Table 1. Once the auxiliary arrays are filled, *find_next_river_cell* function finds the neighbor, which will become the next channel cell of the channel and so the next cell to be addressed. If upstream accumulation is chosen as the hierarchy attribute, the array to assess is *flowacc_neighbors*. Instead, if upstream distance is chosen as the hierarchy attribute, the array to consider is *flowdist_neighbors* (Fig. 2.B).

The selection process of the next channel cell is different depending on the hierarchy. For Horton hierarchy, the first step is to find the neighbor that flows into the channel cell and has equal Strahler value than the channel cell. If there is a neighbor that meets both conditions, this neighbor's index will be stored in the *xy_channel*. On the other hand, if there is no neighbor meeting these previous conditions, the neighbor that has the highest hierarchy attribute value will be taken as the next channel cell and its index will be stored in *xy_channel*. If several neighbors have the same hierarchy attribute value, elevation is prioritized. The highest elevated neighbor will be the next channel cell in the channel.

For Hack hierarchy, the first step is to find a neighbor which flows into the channel cell and has the highest hierarchy attribute value. If there is only one neighbor that meets both conditions, this neighbor's index will be stored in the *xy_channel*. Else, if there is more than one neighbor with equal hierarchy attribute value, elevation will be taken into account and highest elevated cell will be chosen as the next channel.

The last step in the channel network extraction process is to identify the pour points that will be the initial points to delineate tributaries. The *find_junctions_cells* checks the value of the minimum basin area parameter. If no value has been set for this parameter, minimum basin area is set to 0.01% of the DEM drainage area as default. Only the neighbors flowing to the channel cell with equal or higher basin area than the value computed, except for the neighbor already identified as the parent channel, will be considered as pour points and its linear

index will be stored in the *xy_junction* array (see Table 1 and Fig. 2.B).

The *build_channel* function continues to loop until it finds the headwater of the channel. Then it returns *xy_channel*, *order_channel*, *xy_junction* and *order_junction* arrays to the *build_channel_network* function and starts looping over the newly found pour points to begin a new process of channels extraction. This process keeps on looping until *stream_matrix* and *junction_matrix* are successfully generated in the *build_streams_map* function. Finally, *stream_matrix* and *junction_matrix* are copied into two separate ASCII files, one ASCII is for the sorted channel network and the other ASCII contains the pour points. The function to convert a matrix into an ASCII file is from TopoToolbox 2. Each ASCII file receives the name set in *output_name_streamnetwork* parameter and *output_name_junctions* parameter. Additionally, both matrices are represented in MATLAB in separated figures.

Table 1: Variables definition

Variable	Definition
elevation_neighbors	Stores neighbours elevation values
flowacc_neighbors	Stores neighbours flow accumulation values
flowdir_neighbors	Stores neighbours flow direction values
flowdist_neighbors	Stores neighbours flow length values
strahler_neighbors	Stores neighbours Strahler values
coord_xy_neighbors	Stores neighbours coordinate linear indices
xy_channel	Stores coordinate linear indices of a channel or channels
order_channel	Stores order values of the correspondent channel cells
xy_junction	Stores coordinate linear indices of pour points
order_junction	Stores order values of their correspondent pour points
stream_matrix	Matrix with the extracted channel network
junction_matrix	Matrix containing the pour points of the channel network

3.4. Case of study

The case of study is located in the Pisuerga watershed (Fig. 3). Pisuerga river belongs to Duero watershed in the Iberian Peninsula. Duero watershed is one of the main hydrological systems in Iberia. Duero river is approximately 900 km in length, spans over an area of 97,300 km² and has 22,000 hm³ year⁻¹ of water contribution (Morán-Tejeda *et al.* 2011). Duero river is a transboundary river that flows westward through Spain to Portugal, ending in the Atlantic Ocean. Pisuerga river is one Duero's main tributaries. The Pisuerga-Carrión Unit is surrounded to the north by the Cantabric System and to the northeast by the Iberian System (Pastor-Galán *et al.* 2014). Pisuerga river is 270 km in length with a watershed of 15,700 km². Two of its main tributaries are Arlanza river, on the left side, and Carrion

river, on the right side. Pisuerga DEM is derived from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (Rabus *et al.* 2003) version 4.1 of 90 m of spatial resolution. ArcGIS 10.3 (ESRI) (Refice *et al.* 2012) software was used to delineate Pisuerga's watershed.

The tool has been applied to the Pisuerga basin. For all the cases shown in Figure 4, optional parameters were left as empty. The objective was to sort the entire drainage network, ordering it from the main channel up to the tributaries with smaller drainage area. Hack hierarchy, was sorted by upstream distance as the hierarchy attribute (Fig. 4.A) and by upstream accumulation (Fig. 4.B). For Horton hierarchy, channel networks were extracted by upstream distance (Fig. 4.C) and by upstream accumulation (Fig. 4.D). To represent the results, drainage networks in ASCII format appear on the left side in each of the subfigures in Figure 4. On the right side of each subfigures, networks were transformed to vector format, to observe the hierarchy of the main rivers, for what the flow direction matrix generated internally in the extraction process was used. For the subfigures representing data in vector format, the colored rivers are the rivers identified as the master channel and main tributaries: Carrion, Valdivia, Odra, Arlanza and Arlanzon.

4. Results and discussion

Four channel networks with approximately 2,700 rivers have been obtained and the most important first-order tributaries with lengths greater than 67 km have been filtered and converted to vector format. Also the Arlanzón second-order tributary has been filtered

because some hierarchies have considered it as part of the master channel (Figs. 4.B and 4.D). These rivers are equivalent to the tributaries of Carrión, Valdivia, Odra, Arlanza and Arlanzón recognized as main tributaries by the Confederación Hidrográfica del Duero (CHD) and by the Instituto Geográfico Nacional (IGN). The CHD vector channel network, scale 1: 50,000, was also filtered using the same criteria to compare the results. In general, the trajectories of the rivers obtained with the tool coincide with the channels provided by the CHD and IGN.

For the cases in which the upstream distance has been the hierarchy attribute, the river identified as the main channel follows the Pisuerga path recognized in the topographic maps of the IGN (Figs. 4.A and 4.C). In addition to this, in Hack hierarchy (Fig. 4.A), tributaries of Carrion, Valdivia, Odra and Arlanza have been identified as first order tributaries, and Arlanzon river as second order tributary, resembling the the CHD and IGN channel networks for the Pisuerga watershed.

However, the two channel networks that have been ordered by upstream accumulation (Fig. 4.B and 4.D), have identified Arlanzon River as part of the main river, turning the Pisuerga upper reach into a tributary of this one. In these two networks, Arlanzon river, accumulates more water at the pour point than Pisuerga upper reach. This is due to the fact that the gradients of the slopes, especially at the upper reach of Arlanzon river, are more pronounced than those slopes in the upper reach of the Pisuerga river, which causes Arlanzon's flow accumulation cells, derived from the direction model, compute higher accumulation value at the confluence of both rivers.

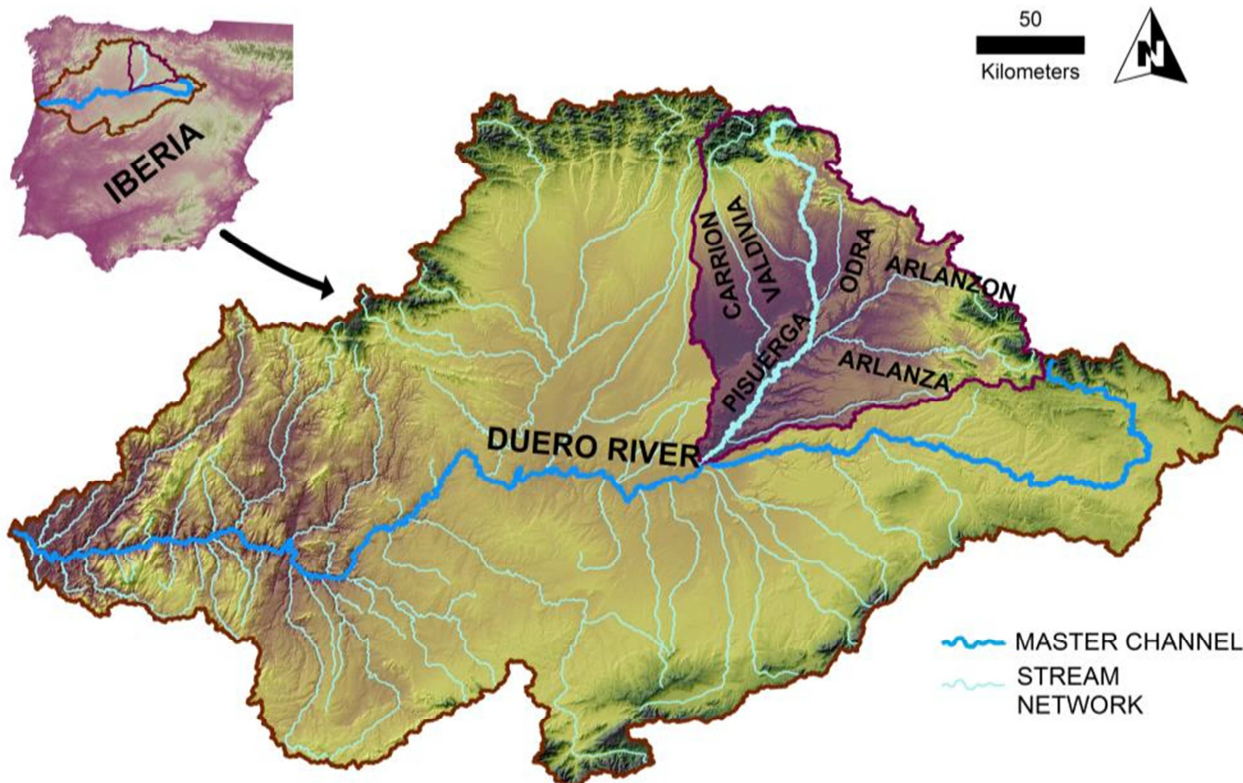


Figure 3: Duero basin SRTM v.4.1 DEM showing the master channel and main tributaries areas, Pisuerga watershed and main tributaries in Pisuerga catchment: Carrion, Valdivia, Odra rivers and the Arlanza-Arlanzon system.

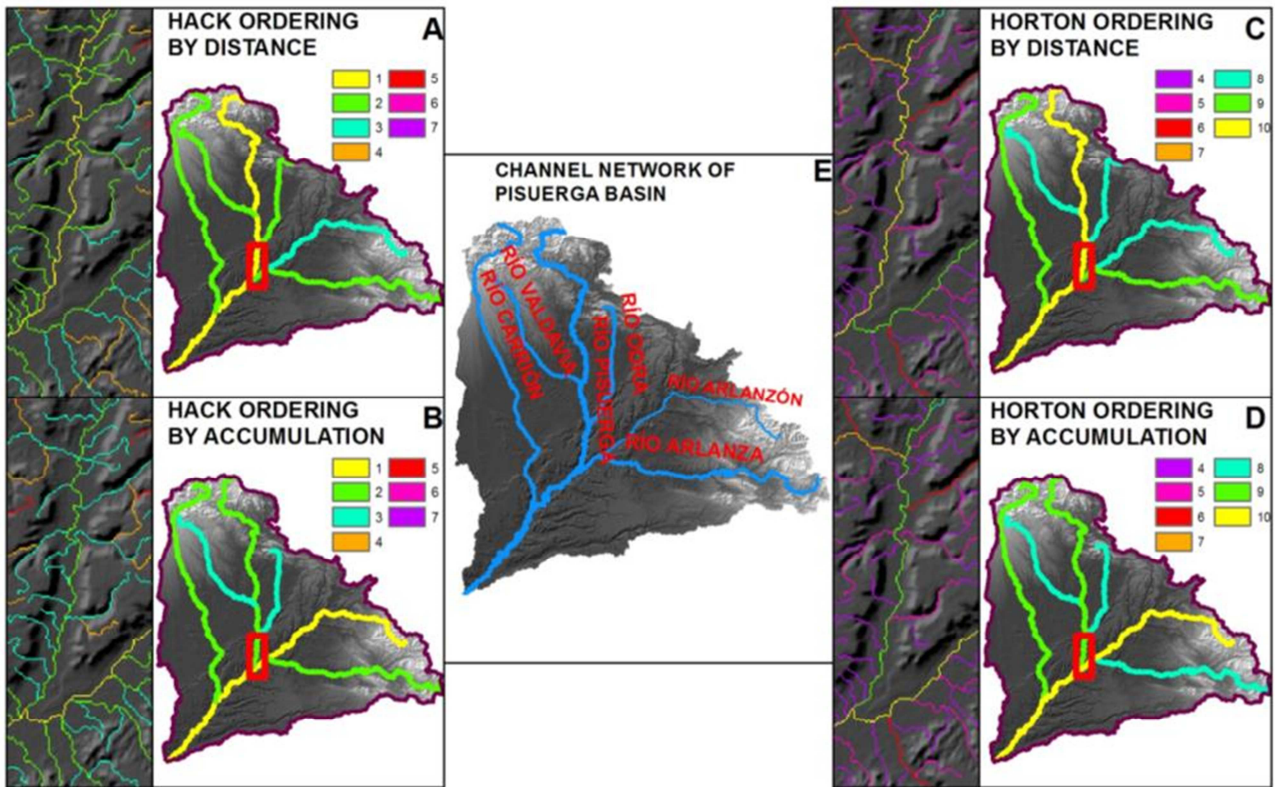


Figure 4: The networks represented in the subfigures were extracted from the DEM SRTM V.4.1 90 m, for the Pisuerga watershed using the following combination of parameters: (A) Network ordered by Hack hierarchy using upstream length as hierarchy attribute. (B) Network ordered by Hack hierarchy using upstream accumulation as hierarchy attribute. (C) Network ordered by Horton hierarchy using upstream length as hierarchy attribute. (D) Network ordered by Horton hierarchy using upstream accumulation as hierarchy attribute. (E) Official hydrological network from the Confederación Hidrográfica del Duero at 1: 50,000 scale.

The combination of factors that in the past determined the hierarchy and the headwaters location of a drainage network varies depending on the place. These historical reasons determine the fluvial networks presented in nowadays topographic maps. A characteristic of the Arlanza-Arlanzon hydrologic unit is that it is not clear which river is tributary of the other, since its flows rates are similar.

Drainage networks that are extracted using this tool, do not totally represent the official drainage network of a watershed, although they represent a way to sort a continuous channel network. If willing to work with official geospatial data, it is necessary to obtain it from services that provide official geographic data. This tool provides a sorted channel network and also information of the drainage watershed from which can be inferred other information such as the topography and geomorphology of the terrain. In addition, a sorted network by one of these two hierarchies, eases the following steps in the analysis of a basin, for instance facilitates the automation of geomorphological indices, such as Valley Height-Width Ratio (V_f), Stream Length-Gradient Index (SL), basin asymmetry factor (Antón *et al.*, 2014), etc., which require a continuous channel network previously extracted from the DEM. These indices give a more extensive knowledge of the characteristics and properties of a watershed, and the combination these indices provides very significant information on fluvial morphology useful to understand landscape evolution in terms of tectonics, climate change or geomorphological processes.

5. Conclusions and further work

In this paper, we present a new MATLAB-based tool for drainage network ordering in a non-spatial environment. The tool works along with TopoToolbox 2 toolkit, to generate the flow-routing maps previous to the channel network extraction and ordering. The tool offers two ordering hierarchies, Hack and Horton. This tool is applicable to any DEM, with low time-consumption on small-size DEMs. The tool was applied to the Pisuerga basin, a subbasin of the Duero river, and the differences in the results derived from the different combination of parameter values support its robustness.

Up to our knowledge, nowadays no tool was available for conventional GIS or non-spatial software that allowed the ordering of stream networks by Hack and Horton hierarchies. In addition to this, this tool allows choosing the hierarchy attribute to lead the sorting process, between upstream accumulation and upstream distance. Also, the high number of optional parameters enables to attain a high tailored sorted drainage network which may best suites the user's requirements, such as selecting the maximum order of tributaries instead of extracting a complete network.

Horton and Hack hierarchies provide a continuous drainage network, as each channel retains the same value from its mouth to the header. Unlike nodes graphs, this type of ordering eases the analysis of terrain properties that can be inferred from them. A channel network sorted by one of those hierarchies are necessarily the starting point of other terrain analyzes,

such as the extraction of longitudinal profiles or the calculation of other geomorphometric indices. Geomorphological indices are used to quantify properties of the terrain and allow inferring characteristics of it in a quantitative format. Not only by interpreting the information each of these geomorphological indices gives, but also combining several indices, increases the information about the

terrain characteristics and enables to provide geological and geomorphological interpretations.

Acknowledgements

This work was supported by MEC under Grant PEJ-2014-A-93258; by UNED under Grant GID2016-19; and it was partially funded by MITE under Grant CGL2014-59516-P and CARESOIL S2013/MAE-2739 projects.

References

- AI, T., 2007. The drainage network extraction from contour lines for contour line generalization. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **62**, pp. 93-103.
- ANTÓN, L., DE VICENTE, G., MUÑOZ-MARTÍN, A. and STOKES, M., 2014. Using river long profiles and geomorphic indices to evaluate the geomorphological signature of continental scale drainage capture, Duero basin (NW Iberia). *Geomorphology*, **206**, pp. 250-261.
- ANTON, L., MATHER, A.E., STOKES, M., MUNOZ-MARTIN, A. and DE VICENTE, G., 2015. Exceptional river gorge formation from unexceptional floods. *Nature Communications*, **6**.
- ANTON, L. and MUNOZ MARTIN, A., 2007. Controles tectónicos y estructurales de la incisión fluvial en el centro-oeste de la Cuenca del Duero, NO de Iberia. *Geogaceta*, **43**, pp. 51-54.
- ANTÓN, L., RODÉS, A., DE VICENTE, G., PALLÀS, R., GARCIA-CASTELLANOS, D., STUART, F. M., BRAUCHER, R. and BOURLÈS, D., 2012. Quantification of fluvial incision in the Duero Basin (NW Iberia) from longitudinal profile analysis and terrestrial cosmogenic nuclide concentrations. *Geomorphology*, **165–166**, pp. 50-61.
- EATON, J. W., BATEMAN, D., HAUBERG, S. and WEHBRING, R., 2014. *GNU Octave version 3.8.1 manual: a high-level interactive language for numerical computations*, CreateSpace Independent Publishing Platform.
- FONT, M., AMORESE, D. and LAGARDE, J.L., 2010. DEM and GIS analysis of the stream gradient index to evaluate effects of tectonics: The Normandy intraplate area (NW France). *Geomorphology*, **119**, pp. 172-180.
- GRAVELIUS, H., 1914. *Flusskunde*. Goschen Verlagshan dlug Berlin. *Zavoianu, I.(1985): Morphometry of Drainage Bassins*. Amsterdam, Elsevier.
- HACK, J.T., 1957. *Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland*, US Government Printing Office.
- HORTON, R.E., 1945. Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins; Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology. *Geological Society of America Bulletin*, **56**, 275.
- JASIEWICZ, J. and METZ, M., 2011. A new GRASS GIS toolkit for Hortonian analysis of drainage networks. *Computers & Geosciences*, **37**, pp. 1162-1173.
- JENSON, S.K., 1985. Automated derivation of hydrologic basin characteristics from digital elevation model data. *Proc. Auto-Carto*, pp. 301-310.
- JIMÉNEZ-CANTIZANO, F., ANTÓN, L., SORIA-JÁUREGUI, Á. and PASTOR-MARTÍN, C., 2017. Cálculo del perfil teórico de equilibrio de un río en función del índice de gradiente. *Geogaceta*, **62**.
- KIRBY, E. and WHIPPLE, K., 2001. Quantifying differential rock-uplift rates via stream profile analysis. *Geology*, **29**, pp. 415-418.
- LINDSAY, J.B., 2003. A physically based model for calculating contributing area on hillslopes and along valley bottoms. *Water Resources Research*, **39**.
- MATHER, A.E. and HARTLEY, A.J., 2006. The application of drainage system analysis in constraining spatial patterns of uplift in the Coastal Cordillera of northern Chile. *Special Paper - Geological Society of America*, **398**, pp. 87-99.
- MATHWORKS, 2012. *Bioinformatics Toolbox: User's Guide (R2012a)*. Available: http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/bioinfo/bioinfo_ug.pdf.
- MOORE, I.D., GRAYSON, R.B. and LADSON, A.R., 1991. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, **5**, pp. 3-30.
- MORÁN-TEJEDA, E., IGNACIO, L.M., ANTONIO, C.B. and SERGIO M,V.S., 2011. Evaluating Duero's basin (Spain) response to the NAO phases: spatial and seasonal variability. *Hydrological Processes*, **25**, pp. 1313-1326.
- O'CALLAGHAN, J.F. and MARK, D.M. 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer vision, graphics, and image processing*, **28**, pp. 323-344.
- PASTOR-GALÁN, D., MARTÍN-MERINO, G. and CORROCHANO, D., 2014. Timing and structural evolution in the limb of an orocline: The Pisuerga–Carrión Unit (southern limb of the Cantabrian Orocline, NW Spain). *Tectonophysics*, **622**, pp. 110-121.

- PEDRERA, A., PÉREZ-PEÑA, J.V., GALINDO-ZALDÍVAR, J., AZAÑÓN, J.M. and AZOR, A., 2009. Testing the sensitivity of geomorphic indices in areas of low-rate active folding (eastern Betic Cordillera, Spain). *Geomorphology*, 105, 218-231.
- PÉREZ-PEÑA, J.V., AZAÑÓN, J.M., AZOR, A., DELGADO, J. and GONZÁLEZ-LODEIRO, F., 2009. Spatial analysis of stream power using GIS: SLk anomaly maps. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, 16-25.
- RABUS, B., EINEDER, M., ROTH, A. and BAMLER, R., 2003. The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 57, 241-262.
- REFICE, A., GIACHETTA, E. and CAPOLONGO, D., 2012. SIGNUM: A Matlab, TIN-based landscape evolution model. *Computers & Geosciences*, 45, 293-303.
- SCHWANGHART, W. and KUHN, N.J., 2010. TopoToolbox: A set of Matlab functions for topographic analysis. *Environmental Modelling & Software*, 25, 770-781.
- SCHWANGHART, W. and SCHERLER, D., 2014. Short Communication: TopoToolbox 2 – MATLAB-based software for topographic analysis and modeling in Earth surface sciences. *Earth Surface Dynamics*, 2, 1-7.
- SHREVE, R.L., 1967. Infinite topologically random channel networks. *The Journal of Geology*, 75, 178-186.
- SHUGAR, D. H., CLAGUE, J. J., BEST, J. L., SCHOOF, C., WILLIS, M. J., COPLAND, L. & ROE, G. H. 2017. River piracy and drainage basin reorganization led by climate-driven glacier retreat. *Nature Geoscience*.
- STRAHLER, A.N., 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38, 913-920.
- TOMA, L., WICKREMESINGHE, R., ARGE, L., CHASE, J.S., VITTER, J.S., HALPIN, P.N. and URBAN, D., 2001. Flow computation on massive grids. Proceedings of the 9th ACM international symposium on Advances in geographic information systems, ACM, pp. 82-87.
- TUCKER, G.E. and HANCOCK, G.R., 2010. Modelling landscape evolution. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, 28-50.
- WHIPPLE, K.X., WOBUS, C., KIRBY, E. and SNYDER, N.P., 2003. Tectonics from topography; methods, application, and limitations. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 84.