

# CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA DE ELEMENTOS COMPLEJOS MEDIANTE LA INTEGRACIÓN DE DIFERENTES TÉCNICAS GEOMÁTICAS. RESULTADOS OBTENIDOS EN DIFERENTES CUEVAS DE LA CORNISA CANTÁBRICA.

V. Bayarri<sup>1</sup> y E. Castillo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> GIM Geomatics S.L. C/ Poeta José Luís Hidalgo nº5 (con frente a C/ Jesús Cancio). 39300 Torrelavega – Cantabria. [www.gim-geomatics.com](http://www.gim-geomatics.com)

<sup>2</sup> Área de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria. Avda. Los Castros s/n, 39005, Santander

E-mails: [vicente.bayarri@gim-geomatics.com](mailto:vicente.bayarri@gim-geomatics.com) , [castille@unican.es](mailto:castille@unican.es)

**Palabras clave:** Cartografía, Cuevas, GNSS, fotogrametría, láser escáner 3D, espeleología, algoritmos de modelado 3D

## RESUMEN:

Las cuevas naturales constituyen una parte importante del patrimonio natural de cada país, las que poseen alguna representación de arte son parte fundamental del patrimonio histórico y ambas son o pueden llegar a ser un excelente recurso turístico además de un excelente laboratorio vivo para entender su comportamiento. Existen cuevas que cuentan con diferentes versiones de cartografía, que a menudo no coinciden como consecuencia de la diferente fiabilidad de los métodos empleados y de la complejidad de las mismas.

La importancia que se le da a la geomática (si bien tradicionalmente se le ha dado sólo a la topografía), dentro de la espeleología, estriba en que cualquier estudio posterior al descubrimiento de una cavidad necesita un plano de ella en el que basarse. De aquí que el levantamiento topográfico sea una de las primeras labores que se realizan. Las diferentes ciencias geomáticas de representación del terreno son, por tanto, las primeras técnicas auxiliares de la espeleología; esto es, una base fundamental sobre la que apoyar posteriormente diferente información multidisciplinar proveniente de otras ciencias.

Tradicionalmente, la topografía tenía como objetivo el dibujo final de una planta, un perfil longitudinal y algunas secciones. Tener una base cartográfica precisa y rigurosa de cavidades facilita la creación de proyectos de mejora de accesos, la localización de testigos empleados en la monitorización de parámetros como la temperatura, humedad, concentración de gases o el cálculo de posición e intensidad de dispositivos de iluminación, con el objeto de que sean menos agresivos con el entorno, en el caso de aquellas cuevas que cuentan con arte rupestre

Las integración de herramientas geomáticas tradicionales como son los sistemas globales de navegación por satélite y la estación topográfica total con otras más recientes como los láser escáner 3D, permite realizar un registro rápido, de precisión y fiable de elementos complejos con el objetivo de poder llegar a derivar una documentación exhaustiva que abarca desde los planos en planta, curvas de nivel, secciones longitudinales y transversales; análisis tridimensionales como cálculo de alturas de galerías o monteras y hasta sistemas de realidad virtual.

El presente artículo describe las tareas necesarias tanto en la captura como en el tratamiento de los datos para poder generar documentación métrica de alta precisión y detalle de elementos tan complejos y singulares como las cuevas y las cavidades.

## 1 Introducción

El término karst es utilizado para definir aquellos paisajes cuyo modelado se debe, fundamentalmente, a procesos de disolución de rocas carbonáticas. Uno de los elementos más característicos del karst son las cuevas o cavidades kársticas. Alrededor de una cuarta parte del territorio español está formado por materiales karstificables. En España se conocen más de diez mil cuevas.

Las cuevas han sido utilizadas por el hombre desde la antigüedad; en ellas se han encontrado una gran variedad de yacimientos arqueológicos. También son importantes las cavidades como hábitat para diferentes especies de seres vivos, que han colonizado los espacios subterráneos a lo largo del tiempo, dejando como prueba de ello interesantes yacimientos paleontológicos. Tanto los restos arqueológicos, como los paleontológicos hallados en las cavidades, nos ayudan a reconstruir cómo fue la vida en el pasado. Además, el karst presenta un importante valor geológico, ya que permite realizar en él numerosos estudios, especialmente en el interior de sus cavidades; un ejemplo es el estudio de espeleotemas mediante técnicas de datación e isotópicas, con el fin de elaborar reconstrucciones paleoclimáticas que permitan conocer los cambios del clima en el pasado, e intentar predecir los cambios futuros.

Por otra parte, hay que tener en cuenta la importancia del karst para el desarrollo socioeconómico en el ámbito local, destacando el uso de los recursos hídricos subterráneos que albergan los acuíferos kársticos, y concluyen un notable activo ecológico, económico y social. Notar que desde finales del siglo XVIII ya se visitaban algunas cavidades españolas.

El arte rupestre de la cornisa cantábrica en España [1] está formado por una serie de manifestaciones artísticas en cuevas y abrigos rocosos pertenecientes a la época del paleolítico superior. De hecho, las primeras manifestaciones de arte rupestre descubiertas fueron en Cantabria, en concreto en la cueva de Altamira, hallazgo que se asumió con escepticismo hasta que no se encontraron pinturas pertenecientes a la misma época y estilo (arte francocantábrico) en la Dordoña francesa. Se trata de la primera gran manifestación artística de la humanidad, y suelen representarse figuras de animales típicos de la última era glacial, como bisontes, caballos, ciervos, renos o toros.

En la reunión de la Unesco celebrada en Québec (Canadá) en julio de 2008 se amplió la consideración de la Cueva de Altamira para incluir otras cavidades, pasando a llamarse el lugar «Cueva de Altamira y arte rupestre paleolítico del Norte de España» (en inglés [2], *Cave of Altamira and Paleolithic Cave Art of Northern Spain*). La UNESCO justificó la extensión del sitio de la siguiente manera [3]: “*La propiedad representa el apogeo del arte rupestre paleolítico que se desarrolló por toda Europa, desde los Urales hasta la Península Ibérica, desde el año 35.000 al 11.000 a. C. Debido a sus galerías profundas, aisladas de influencias climáticas externas, estas cuevas están particularmente bien conservadas. Están inscritas como obras maestras del genio creativo y como el primer arte logrado por la humanidad. También están inscritas como testimonios excepcionales de una tradición cultural y como ilustraciones sobresalientes de una etapa significativa de la historia humana*”.

La cita hace referencia a las galerías profundas, aisladas de influencias climáticas externas, que hacen que estén particularmente bien conservadas. No obstante en la actualidad existen diversas cuevas abiertas a la visita turística con problemas de conservación, debido al deterioro provocado por elementos extraños introducidos en la cueva para facilitar su explotación, como son los elementos metálicos, materiales de relleno, luminarias y cableados eléctricos.

Por otra parte, la propia explotación turística con un elevado número de personas durante un periodo sostenido, provoca cambios en la naturaleza del aire de las cavidades mal ventiladas. Aumenta la proporción de dióxido de carbono y la temperatura normal de las cavidades, lo que conlleva la degradación de espeleotemas por vía química y biológica. Estos cambios, provocan daños en muy poco tiempo en entornos muy frágiles, que se han formado durante miles de años. El problema es más agudo si cabe, cuando en estas cavidades hay pinturas rupestres que se deterioran por los cambios ambientales.

Disponer de una base cartográfica precisa de una cavidad tanto en 2D como en 3D, es importante a la hora de volcar la información capturada, interrelacionar parámetros y llevar a cabo una gestión eficaz de la misma; si bien ésta se puede convertir en fundamental a la hora de elaborar y testear modelos de predicción basados en el conocimiento.

Cada día se realizan más estudios, y éstos con mayor detalle llegando a existir auténticos laboratorios subterráneos en los que se trata de comprender:

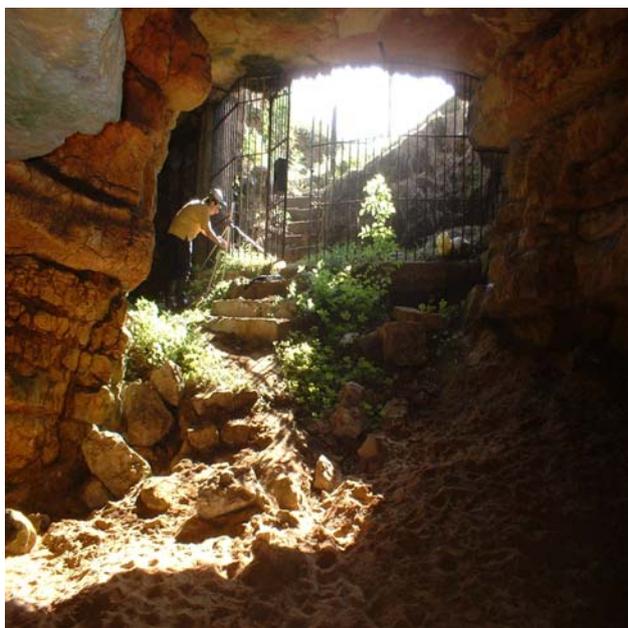
- *Estudios hidroquímicos*: Los estudios sistemáticos de las características físicas y químicas de las aguas, constituyen uno de los métodos para dar seguimiento a la evolución del karst. Se vuelca información como el pH, la temperatura del agua, la conductividad, los sólidos totales disueltos, el CO<sub>2</sub> disuelto y el O<sub>2</sub> disuelto.
- *Microbiología del agua*.
- *Estudio climáticos*: La presencia de personas en el interior de las cavidades puede generar diferentes tipos de contaminación térmica, química y biológica. La cantidad de personas que a diario permanecen cierto tiempo en la cueva es una fuente importante de generación de calor y aporte de CO<sub>2</sub> a la atmósfera confinada. Por ello, la definición de un umbral de equilibrio debe ser una práctica común en la gestión ambiental de cualquier cavidad turística, ya que permite establecer un régimen óptimo de visitas, clave en la conservación del patrimonio kárstico [4] y [5].
- Estudios de fauna.
- Estudios geotécnicos.

Se miden múltiples parámetros, y muchos de ellos altamente correlacionados. El disponer de una cartografía lo suficientemente precisa ayuda en la aplicación de modelos de predicción de comportamientos o respuestas. Además, la información creada, también puede ser empleada para la divulgación de la cueva y su complejo.

## 2. Antecedentes

La importancia que tradicionalmente se le ha dado a la topografía, dentro de la espeleología, estriba en que cualquier estudio posterior al descubrimiento de una cavidad necesita de un plano de ella en el que basarse. De aquí que el levantamiento topográfico es una de las primeras labores a realizar, y además constituye el soporte fundamental sobre el que volcar todos los estudios posteriores.

En la actualidad existen diferentes niveles de precisión en lo que a topografía de cuevas se refiere. Una representación del medio físico es útil cuando cumple el fin por el que fue creada. Al igual que en el proceso cartográfico, existe una escala de valores de precisión dependiendo de los instrumentos utilizados:



1. Esquema de memoria, sin escala, apoyado con descripciones.
2. Dibujo a simple vista, realizado sin instrumentos, con escala aproximada.
3. Plano rudimentario dibujado con datos proporcionados por una pequeña brújula graduada de 10 en 10° y cuerda o cinta con divisiones en metros.
4. Brújula de prisma con divisiones de 1° y medio grado, cinta métrica.
5. Brújula de prisma y clinómetro calibrados y cinta métrica indeformable.
6. Brújula, clinómetro y cinta, pero con trípode.
7. Mediciones con taquímetro tradicional.
8. Mediciones con estación total de medición sin prisma.
9. Mediciones que incluyen Láser Escáner 3D.

Figura 1: Levantamiento realizado en una cueva en Cantabria.

Según se avanza en la escala, las medidas cuentan con mayor precisión y se puede alcanzar una mayor detalle de manera más rápida y rigurosa.

Tradicionalmente, la topografía tenía como objetivo el dibujo final de una planta, y a lo sumo un perfil longitudinal y algunas secciones. A continuación se describirá la metodología adoptada para caracterizar geoméricamente con precisión cuevas, estimando el error cometido y poder extraer gran cantidad de información plani-altimétrica fiable para ser introducida en los modelos de predicción de comportamientos.

La precisión y la rigurosidad en los trabajos llevados a cabo en las cavidades facilita la creación de proyectos de mejora de accesos, el entendimiento de interrelación de parámetros, la modelización de comportamientos, la estimación de daños potenciales por diferentes factores, etc.

## 3. Metodología

A continuación se describe la metodología seguida en la caracterización de diferentes cuevas de la Cornisa Cantábrica. El propósito de los levantamientos ha sido diferente en cada uno de los casos.

### 3.1 Elección del sistema de referencia

Para llevar a cabo un correcto registro de la información de la cueva, en un sistema homogéneo, es necesario determinar con claridad el sistema de referencia y la proyección, pues si bien en España, actualmente se recomienda entregar la documentación en el sistema de referencia global ETRS89 materializado por la Red Geodésica Nacional mediante técnicas espaciales (REGENTE), existe gran cantidad de información vigente, que se emplea o empleará para ser correlacionada con la nueva generada que no se encuentra en dicho sistema, principalmente cartografía de superficie o proyectos de construcción en superficie.

Es por esto, que el sistema de referencia empleado en los trabajos ha sido principalmente el ETRS89 (*European Terrestrial Reference System 1989*), siguiendo la recomendación del REAL DECRETO 1071/2007, de 27 de julio, (BOE núm. 207 Miércoles 29 agosto 2007) por el que se regula el sistema geodésico de referencia oficial en España, si bien en diferentes ocasiones se ha tenido que entregar los resultados en el sistema ED50.

### 3.2. Caracterización del Entorno de protección

La tarea se ha realizado en diferentes fases:

#### A) Creación de la red de bases:

Una vez elegido el sistema de referencia, se ha determinado una red de bases por el entorno de protección. El método de observación utilizado ha sido el diferencial tanto mediante observaciones en estático como en tiempo real RTK desde estaciones de referencia, obteniendo las líneas base e incrementos de coordenadas en el sistema global WGS84 desde el equipo de referencia al punto observado. Los tiempos de observación han sido determinados por el número y geometría (GDOP) de los satélites operativos, las perturbaciones de la ionosfera y por la longitud de las líneas-base.

Sobre el terreno se ha creado un fichero de datos para cada punto observado con su numeración definitiva, introduciendo los datos propios del punto. Posteriormente los datos se han procesado para el cálculo de las líneas-base y resolución de ambigüedades, obteniendo a partir de las observaciones GPS, las coordenadas de todos los puntos en el sistema ETRS89.

En el caso de que hubiese sido necesaria una transformación de coordenadas ETRS89 a ED50 se realizó una transformación de semejanza 3D de 7 parámetros modelo Molodensky Badekas. En función de la extensión y del número de cuevas en la localización, se implantan una serie bases ubicadas en las laderas de los montes, quedando materializadas en el terreno mediante clavos de acero o hitos tipo feno, ofreciendo garantías de permanencia. Cada entrada de cueva queda cubierta con al menos dos bases.

#### B) Levantamiento topo-geodésico.

A partir de las bases establecidas se procede a la toma de los puntos necesarios para la realización del levantamiento taquimétrico a la escala acordada del monte (generalmente 1:2000).

La toma de los puntos del levantamiento se realiza de manera mixta, con Estación Topográfica Total en combinación con equipos GPS mediante observaciones diferenciales en tiempo real.

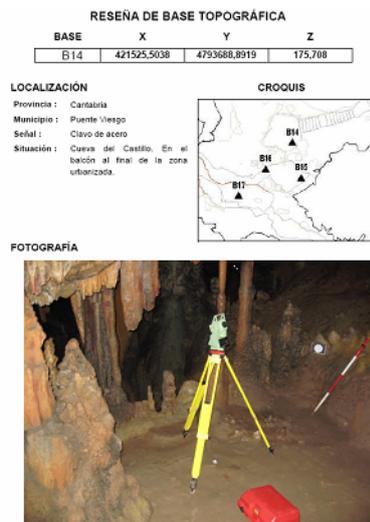


Figura 2: Reseña de base topográfica de uno de los vértices del trabajo.

### 3.3. Creación de la poligonal fundamental

Se observan poligonales cerradas, de ida y vuelta, que posteriormente se ajustan y compensan en cada cueva. Las bases se suelen materializar mediante clavos de acero y desde ellas se radian una serie de bases destacadas y de dianas que se emplean como referencias para la digitalización por Láser Escáner 3D.

El sistema de coordenadas empleado es el mismo que el utilizado en el topográfico del entorno. En la figura posterior aparece un croquis de las poligonales realizadas.



Figura 3: Detalle de láser escáner 3D trabajando en el interior de la cavidad.

### 3.4. Digitalización de las cuevas

Se emplea un Láser Escáner Terrestre 3D panorámico de medición de fase, que ofrece una precisión de (2 mm a los 25 m, con una reflectancia del 85 %), lo cual permite obtener documentos métricos que cumplan con las tolerancias métricas exigidas.

En esta fase, se han cubierto las siguientes fases:

1. Posición y rotación del instrumento
2. Coordenadas espaciales: valor XYZ
3. Intensidad: valor de reflectancia de los materiales

La georreferenciación se realiza empleando las bases topográficas materializadas anteriormente.



Figura 4: Vista planar de la nube de puntos mostrando espeleotemas.

### 3.5. Preprocesado de la información: Limpieza y registro

En esta etapa la información recogida en campo pasa una serie de procesos de filtrado y unión de la información en un único modelo:

1. Limpieza: Se ha eliminado toda aquella información que no se desea (ruido), ya sea de forma manual o automática.
2. Registro: Se encuentra la posición y rotación del instrumento para cada barrido en un sistema de coordenadas específico. Esto se puede hacer a través de referencias que actúan como puntos de control.
3. Optimización del modelo: creación de un modelo homogéneo. El modelo se estructura y divide en partes para facilitar su manejo y comprensión.

El resultado es una nube de puntos, procesada, libre de ruido, en el mismo sistema de referencia. Posteriormente se generaliza la información capturada, reduciendo información, con el objetivo de que fuese posible cargar en memoria la totalidad de los escaneos de ambas cuevas.



Figura 4: Nube de puntos de el escaneo de una cueva.

### 3.6. Procesado de la información: Extracción de información del modelo.

#### A) Plano en planta

El mapa de planta se crea restituyendo sobre la misma nube de puntos. En dicho mapa, aparecen reflejados el contorno de las cavidades, los pasos superiores e inferiores donde los hubiese, los caminos y escaleras existentes en el interior y otros elementos correspondientes a la urbanización de las salas como puntos de luz. También se vuelca el eje de la poligonal empleado para observar el marco de referencia. Toda la información se encuentra dispuesta en capas.

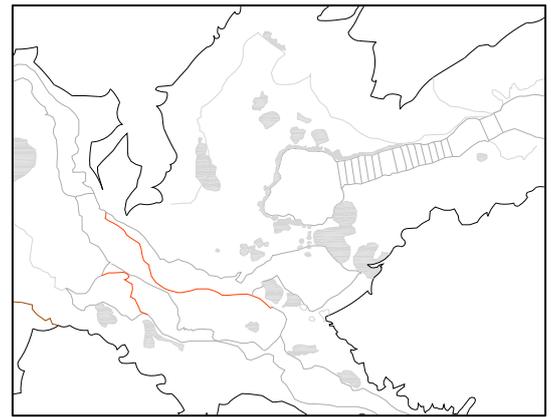


Figura 5: Detalle de plano en planta de la cavidad.

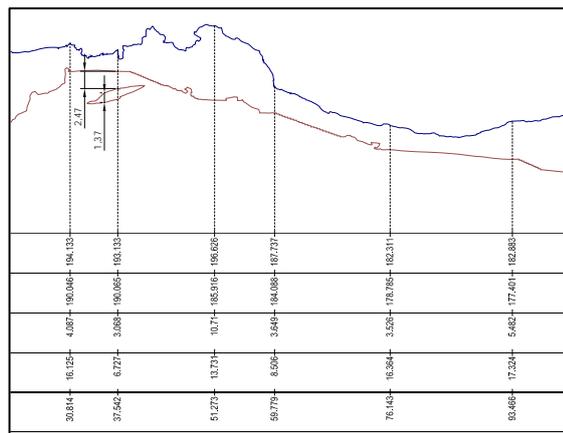


Figura 6: Detalle de plano en planta de la cavidad.

#### B) Secciones longitudinales

La sección longitudinal se suele trazar siguiendo el eje de la poligonal y en ella aparecen reflejadas, en forma de diagrama de guitarra la información de cota de techo, cota de suelo, altura de la sala, distancia parcial, distancia al origen, etc.

El disponer de una información continua, permite que la sección longitudinal pueda ser trazada por cualquier punto, al contrario que con los métodos tradicionales de medición.

#### C) Secciones transversales

Se crean y acotan a lo largo de toda la cueva secciones transversales en lugares de cambio de sección significativo o de especial interés.

Puesto que se cuenta con una gran densidad de información volumétrica, en el mismo sistema de referencia, es posible trazar una gran cantidad de secciones, y conocer de manera precisa distancia entre galerías, en el caso de que estas transcurran en paralelo. Si no es mediante el uso de estas técnicas combinadas, sería muy laborioso de lograr.

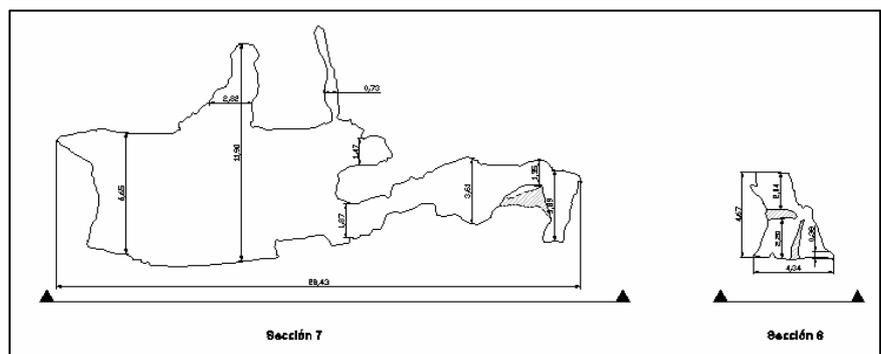


Figura 7: Secciones transversales de detalle.

#### D) Documentación de alturas de galerías

Se crea una serie de mapas con las alturas de las galerías. Dichos mapas suelen tener una resolución entre 5 y 20 cm. Desde el punto de vista de la geometría computacional aplicado a las cuevas se pueden definir diferentes alturas de galerías:

1. Simple: Caso de una galería lineal, es la distancia, para un mismo par de coordenadas X,Y entre la cota mínima y la máxima.
2. Zonas de sombra: En ocasiones no existe información en algunos puntos, pues no han sido escaneados al encontrarse en zonas de sombra. En dicho caso se realiza una interpolación entre los puntos vecinos, para poder contar con una superficie continua.

3. Compuesta: cuando existe una o varias galerías superpuestas. En este caso existen diferentes posibilidades. Calcular la distancia con el par de coordenadas de cada galería o reflejar el rango entre el máximo de la galería superior y el mínimo de la inferior. En función del fin de dicha cartografía se prefiere un método y otro.

Esta cartografía se suele emplear para realizar estudios climáticos y conocer posibles zonas de estancamiento del aire cálido de origen antropogénico.

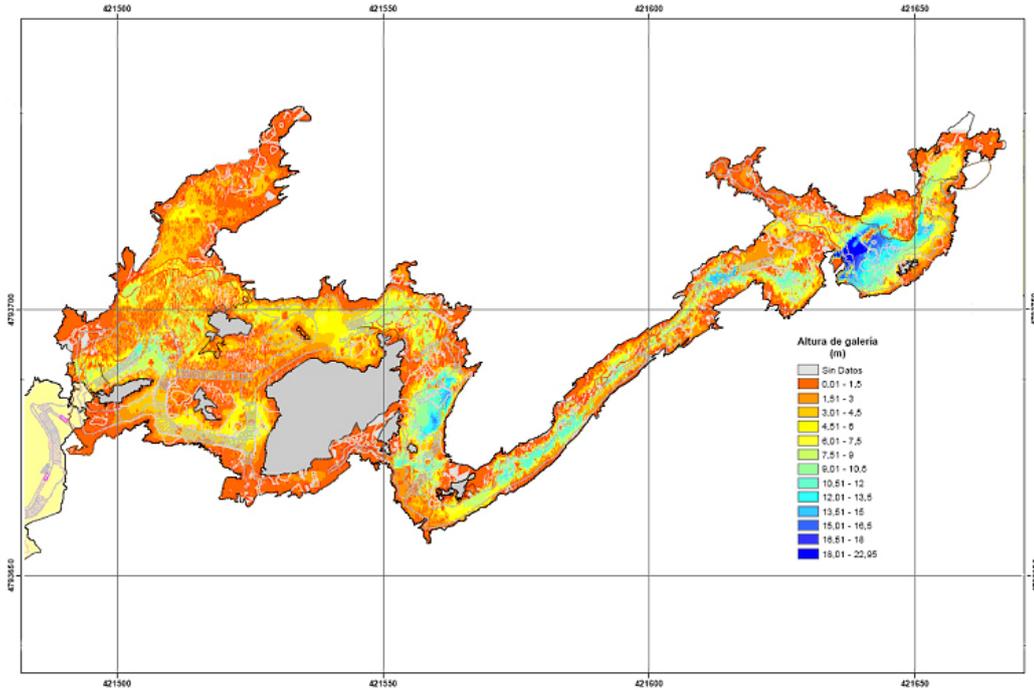


Figura 8: Detalle de altura de galerías.

### E) Documentación de monteras

Se crea una serie de mapas con las monteras de las galerías. Dichos mapas suelen tener una resolución entre 5 y 20 cm. Desde el punto de vista de la geometría computacional es la distancia, para un mismo par de Coordenadas XY, entre la cota en superficie y el techo de la cueva.

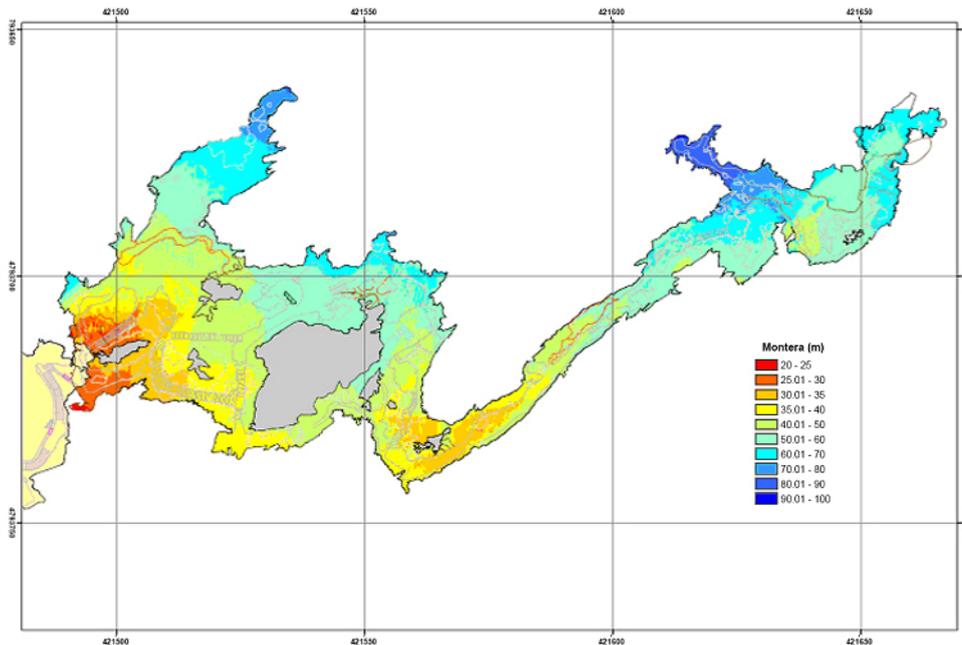


Figura 9: Detalle de monteras.

### F) Documentación vectorial de curvas de nivel

También es posible crear series de cartografía de curvas de nivel con equidistancias entorno a 50 cm. Se realizan dos modelos, el primero corresponde al suelo y el segundo al techo de las cuevas.

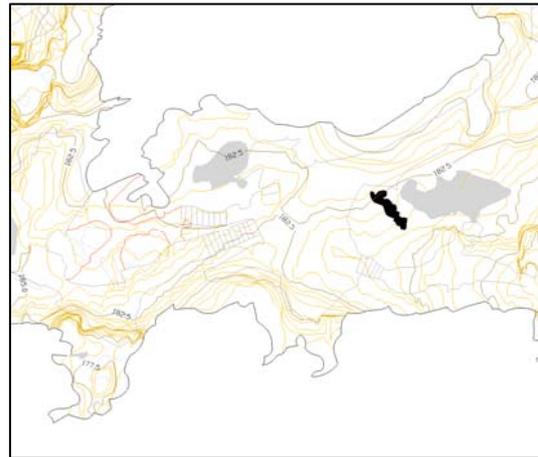


Figura 10: Altimetría de las cuevas.

### F) Generación de modelos virtuales.

Finalmente, siguiendo las indicaciones de [6] es posible construir un modelo virtual de la cavidad que puede ser empleado en sistemas de realidad virtual. A grandes rasgos los pasos que se siguen son los siguientes:

- Transformación de los modelos de puntos obtenidos mediante escáner en geometría manipulable.
- Construcción del modelo 3D.
  - Modelado poligonal continuo.
  - Aplicación de color mediante texturas fotorrealísticas.
  - Cálculo de un modelo de iluminación realista y viable en Tiempo Real.
- Desarrollo del guión de la aplicación
- Programación de aplicación de Realidad Virtual en tiempo real interactiva.
  - Desarrollo de un guión de aplicación.
  - Desarrollo de interfaces y sistemas de manipulación de la aplicación.
  - Representación visual mediante “High Level Shading Language” (HLSL) para obtener una representación realista.
  - Desarrollo e inclusión de elementos multimedia para facilitar la difusión de contenidos a partir de la información existente.



Figura 11: Generación de modelos virtuales.

#### 4. Resultados

A la vista del trabajo realizado se puede concluir que:

- Es posible realizar un registro rápido, de precisión y fiable de elementos complejos como cuevas o cavidades;
- Dicha información puede ser empleada para derivar cartografía tales como planos en planta, curvas de nivel, secciones longitudinales y transversales o análisis tridimensionales como cálculo de alturas de galerías o monteras por comparación de modelos.
- El láser escáner, debido a la rapidez operativa de campo, la exactitud de los datos, las posibilidades de representación y la inocuidad puede considerarse como una herramienta óptima para el patrimonio histórico.
- La combinación de métodos geomáticos tradicionales como la poligonal topográfica y los GNSS (Sistemas de Globales de Navegación por Satélite) con otros modernos como el Láser Escáner 3D permite documentar cuevas de una manera rigurosa, inocua para el posible patrimonio histórico como pinturas y grabados, totalmente respetuosa con el medio, eficaz y eficiente, dentro de un marco de referencia global.
- Dicha información, en una primera fase, puede ser empleada para extraer documentación cartográfica tradicional de las cuevas tal como mapas, información de monteras, alturas de galerías o curvas de nivel que pueden ser empleados como base por los gestores de las mismas para ayudar a la toma de decisiones y realizar diferentes simulaciones de procesos de comportamiento predictivo dentro de un sistema basado en el conocimiento.
- Una salida más novedosa que la documentación cartográfica consiste en la creación de modelos virtuales de elementos patrimoniales, permitiendo la explotación turística de dichos recursos, y evitando el deterioro por el uso abusivo. En definitiva es una solución que permite conseguir un punto de equilibrio entre conservación y difusión.

#### 5. Conclusiones

De cara al futuro se presentan múltiples retos:

- Mejoras computacionales: El estudio de sistemas de algoritmos que permitan acelerar los procesos de adaptación de los datos iniciales en datos geométricos de utilidad con estructura topológica.
- Gestión más eficaz: Crear un sistema gestor de la información de la cueva, que pueda ser empleado en la toma de decisiones sobre la misma. Un sistema dinámico, con información temática que permita el monitoreo de la misma en el tiempo real.
- Investigación científica: Intercorrelación de más parámetros en modelos complejos que integren información hidroquímica, microbiología del agua, climática, geotécnica y de fauna.
- Promoción turística: Visitas virtuales de mayor definición, en función de los avances tecnológicos que van multiplicando la potencia de proceso, será posible filtrar una menor cantidad de los datos adquiridos en la fase inicial, y obtener modelos de mayor definición.

#### 6. Referencias bibliográficas

- [1] González Echegaray, J., González Sáinz (1994) C. *Conjuntos rupestres paleolíticos de la cornisa Cantábrica*, Complutum, 5, 1994: 21-43.
- [2] UNESCO. Cave of Altamira and Paleolithic Cave Art of Northern Spain <http://whc.unesco.org/en/list/310>
- [3] UNESCO. <http://whc.unesco.org/en/news/451>
- [4] Fortea-Pérez J. 1993. La protección y conservación del arte rupestre paleolítico. Columbres (Asturias): Servicio de Publicaciones del Principado de Asturias.
- [5] Juberthie, C. 1995. Underground habitats and their protection. Council of Europe Publishing.
- [6] Barrera, S., Otaola, A., Bayarri, V. 2008, Explotación turística no intrusiva de la Cueva de Santimamiñe (Vizcaya) mediante realidad virtual. II congreso español sobre cuevas turísticas, Cuevatur 2008. 16-18 octubre de 2008.