

Utilidad de las herramientas SIG en la modelización hidrogeológica de minas subterráneas.

Utility of GIS tools in hydrogeological modelling of underground mines.

Ramón Díaz Noriega⁽¹⁾, José Paulino Fernández Álvarez⁽²⁾

⁽¹⁾Unidad de Modelización Hidrogeofísica y Ensayos No Destructivos. Universidad de Oviedo. ramon@hydrogeophysicsndt.com

⁽²⁾Departamento de Explotación de Minas. Área de Prospección e Investigación Minera.

Universidad de Oviedo, Asturias, España. pauli@uniovi.es

SUMMARY

Since more than a century ago, underground coal mines have been exploited in Spain. Today, after their natural flooding, some of them are studied as a possible water resource or for geothermal purposes.

In that regard, the Geographic Information Systems technology is being used as a workhorse for integration, data processing and display. As data collected are usually dispersed, scarce and uncertain, the GIS allows to extract the most of their combination.

In this case, the ultimate goal is to better understand the behavior of water flows involved. To help achieve this objective, we used the ArcGIS together with groundwater flow numerical simulator FEFLOW.

In this article, the GIS tools contribution to convert mining and hydrogeological data into useful information for a groundwater numerical model is shown. Those operations relevant to the conceptual model are discussed. Also those feeding the numerical model or the post-processing phase. Advantages and disadvantages of the employed GIS tools are discussed together with their links with FEFLOW. Finally, common problems present in mining data are discussed as also are the limitations of the GIS regarding them.

1. INTRODUCCIÓN

Los primeros Sistemas de Información Geográfica (SIG), aparecen en torno a los años 60 (Goodchild, 1993). Desde entonces han desarrollado un alto nivel de eficiencia y versatilidad.

Actualmente, proporcionan el soporte lógico adecuado para integrar, almacenar, procesar y visualizar datos espaciales. Son además, un elemento multidisciplinar con aplicación práctica en diversos campos de la ciencia, la industria y la sociedad (Suñer, 2009). Esto ha fomentado la existencia de empresas y organizaciones cuyo objetivo es desarrollar estas herramientas, poniéndolas a disposición de los usuarios, bien como software propietario o software libre. La tabla I muestra a modo de ejemplo un listado con algunas de estas herramientas SIG.

Tabla I – Listado de SIG (GIS List)

SIG libre	
Nombre	Link oficial
OpenJump	http://www.openjump.org/
gvSIG	http://www.gvsig.com/
GRASS	http://grass.osgeo.org/
QGIS	http://www.qgis.org/es/site/
MapWindow	http://mapwindow.org/
SAGA	http://www.saga-gis.org/en/index.html
SPRING	http://www.dpi.inpe.br/spring/
Kosmo	http://www.opensig.es/index.php
uDig	http://udig.refractive.net/
SIG propietario	
Nombre	Link oficial
ArcGIS	http://www.esri.com/software/arcgis/
GeoMedia	http://geospatial.intergraph.com/products/GeoMedia/Details.aspx
MapInfo	http://www.mapinfo.com/
IDRISI	http://clarklabs.org/products/idrisi.cfm

En este trabajo, se utiliza el SIG propietario ArcGIS Desktop, considerada una de las herramientas más potentes y utilizadas del mercado. De esta manera se pretende que el análisis de sus

capacidades y limitaciones sean representativas del estado actual de desarrollo de este tipo de herramientas, al menos en los aspectos que atañen a este trabajo.

En este documento, se aborda un problema hidrogeológico de modelización de flujo de agua y transporte de calor en una mina subterránea de carbón clausurada, que tras su inundación natural está siendo estudiada como yacimiento geotérmico de muy baja entalpía. El aprovechamiento energético de la mina es ya una realidad y está actualmente en funcionamiento para la climatización de edificios, utilizando la tecnología de bomba de calor con una captación geotérmica en circuito abierto, véase (Alonso et al., 2008). Sin embargo, para poder optimizar el uso del yacimiento es necesario caracterizar adecuadamente y entender el funcionamiento del sistema y procesos que lo rigen. Este trabajo engloba tres campos diferentes que convergen en el problema estudiado, la hidrogeología, la minería subterránea y la geotermia (figura 1).

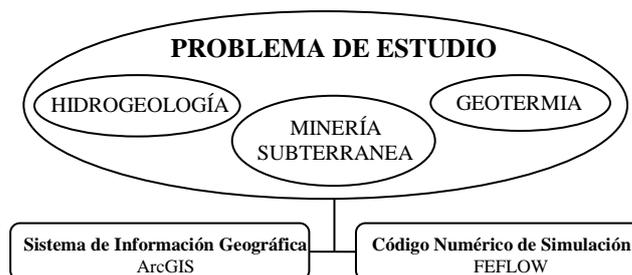


Figura 1 – Contexto de estudio y herramientas utilizadas (Study context and used tools)

Los usos y aplicaciones de la tecnología SIG en cada uno de los tres ámbitos mencionados, han sido planteados por distintos autores con enfoques variados. En la Tabla II se recoge un listado con algunos trabajos interesantes al respecto, indicándose el campo y la aplicación del SIG.

En este caso, se pretende analizar el papel que juega el SIG, en la caracterización hidrogeológica de la mina, con el fin de realizar su modelización geotérmica.

Tabla II – Listado de algunas aplicaciones de los SIG en los campos de la hidrogeología, minería y geotermia
(List of some GIS applications in hydrogeologic, mining and geothermic fields)

Hidrogeología	
Referencias	Aplicaciones
(Fürst, Girstmair, & Nachtnebel, 1993), (Gogu et al., 2001), (Carrera-Hernández & Gaskin, 2007), (Højberg et al., 2013)	Bases de datos hidrogeológicas para gestión de acuíferos.
(Diersch, 1993), (Juan & Kolm, 1996), (Gogu et al., 2001), (Heredia et al. 2001), (Ashaf & Ahmad, 2006), (Arnold & Luinstra, 2009), (Lachaal et al., 2012), (Betancur V., Palacio T., & Escobar M., 2012), (Córdoba, 2012)	Conceptualización y desarrollo de modelos numéricos de simulación de aguas subterráneas.
(Batelaan & De Smedt, 2007), (Chenini & Ben Mammou, 2010), (Malekmohammadi, Ramezani Mehrian, & Jafari, 2012), (Masoud, Schneider, & El Osta, 2013)	Evaluación de recarga de acuíferos.
Minería	
Referencias	Aplicaciones
(Banks et al., 2004), (Korose, Louchios, & Elrick, 2009), (Oh & Lee, 2010), (Malinowska & Hejmanowski, 2010), (Tomas et al., 2010), (Oh & Lee, 2011)	Evaluación de riesgos por subsidencia en minas subterráneas.
(Watzlaf & Ackman, 2006), (ESRI, 2006), (Pasiakos et al., 2007),	Integración de datos para control, desarrollo de las minas o gestión futura.
(Wycisk et al., 2009), (Düzgün, Künzer, & Özgen Karacan, 2011), (Yenilmez et al., 2011)	Control y evaluación de contaminación minera.
(Fang, Model, & Yiqin, 2008), (Li, Zhang, Mao, & Liu, 2009), (Salap, Karslioglu & Demirel, 2010)	Seguridad minera. Evaluación de rutas de rescate y planes de evacuación.
(Latre et al., 2001), (Arranz González, 2008), (Garzón et al., 2009)	Gestión de concesiones y recursos mineros.
Geotermia	
Referencias	Aplicaciones
(Prol-Ledesma, 2000), (Martinez-Estrella, Torres, & Iglesias, 2005), (Noorollahi et al., 2007), (Ondreka et al., 2007), (Carranza et al., 2008), (Noorollahi et al., 2008), (Tüfekçi, Lütfi Süzen, & Güleç, 2010), (Yousefi et al., 2010), (Mendez, Armenta & Silva, 2011), (Gemelli, Mancini, & Longhi, 2011), (Nam & Ooka, 2011)	Análisis de datos para la creación de mapas de distribución de potencial geotérmico y la elección de emplazamientos para su aprovechamiento.
(Cacace et al., 2010), (Nam & Ooka, 2011), (Higuchi, Nishijima, & Fujimitsu, 2013)	Integración, tratamiento de datos y modelización numérica.

El objetivo es describir las aplicaciones prácticas, ventajas y limitaciones de las herramientas SIG en este tipo de problemas, con un caso real de ejemplo. Se abordarán las tareas de integración de información, el procesado de datos y la modelización numérica de flujo subterráneo.

En el apartado 2. Métodos y materiales, se describen las metodologías y tareas más importantes que han sido llevadas a cabo con las herramientas SIG, en el desarrollo del proyecto. Para ello se seguirá la secuencia temporal en la que se realizaron, agrupadas en 3 etapas:

Etapa 1: *Recopilación, análisis y valoración de información.*

Etapa 2: *Conceptualización del problema.*

Etapa 3: *Modelización numérica.*

En el apartado 3. Discusión y resultados, se analizarán y evaluarán algunos aspectos concretos de las metodologías descritas, en los cuales las capacidades de los SIG han demostrado ser herramientas de gran utilidad. Como es el caso de la digitalización y georreferenciación de planos mineros antiguos o el tratamiento de formatos CAD (Computer Aided Design).

También se discutirán las limitaciones observadas, principalmente para la representación tridimensional o el intercambio de datos con el simulador FEFLOW.

2. MÉTODOS Y MATERIALES

Las tareas llevadas a cabo con las herramientas SIG, varían en función de la etapa del proyecto. Pero de una forma u otra, su

presencia es una constante a lo largo de todo el desarrollo del mismo, como se verá a continuación en tres etapas:

Etapa 1: Recopilación, análisis y valoración de información.

El objetivo principal de esta etapa es integrar toda la información sobre el problema de estudio. En ella se analizan y valoran los datos para obtener el modelo conceptual, realizándose las primeras tareas de tratamiento de la información con herramientas SIG, principalmente para el análisis conjunto de datos dispersos y su almacenamiento.

La primera tarea es definir un esquema y crear la base de datos, en este caso del tipo “Geodatabase personal” (ESRI, 2013) que almacena y administra archivos de datos con formato .mdb, lo que facilita su manipulación con Microsoft Access. Debe de tenerse en cuenta que la capacidad de almacenamiento de este tipo de bases de datos está limitada a 2GB.

Después se procede a la integración de la información en esta base de datos, para su análisis espacial.

La principal dificultad en esta etapa es la recopilación y clasificación de información minera útil para la caracterización y modelización hidrogeológica.

Problemas:

1. Los datos mineros se centran en la producción de carbón.

Para obtener datos relevantes a nivel hidrogeológico, es necesario revisar volúmenes grandes de información minera.

2. La longevidad de la actividad minera.

La explotación de las minas de carbón en la zona de estudio, comenzó hace más de 100 años. Esto implica una importante serie temporal de datos con diferentes tipologías, formatos y fuentes, lo que dificulta su recopilación, clasificación e interpretación.

3. Datos de fiabilidad dudosa, imposibles de validar o verificar.

Es común la existencia de pares de datos que se contradicen o reflejan inconsistencias entre sí. En estos casos, simplemente pueden ser descartados o evaluadas las posibilidades que ofrecen. Pero sin una certeza absoluta, dado que no se puede acceder a las minas para su comprobación in situ.

El ejemplo más relevante de este problema se muestra al intentar definir la distribución espacial de los huecos que generaron las minas subterráneas durante su explotación.

Esta información se recoge en los planos de labores mineras, sin embargo estos datos no están disponibles de manera conjunta, sino dispersos en multitud de planos y formatos. Por lo tanto, en primer lugar es necesario integrarlos de manera coherente. Esta información y su conocimiento son obligados, como describe Jardón Palacio (2010), ya que el comportamiento hidrogeológico de la zona tiene total dependencia de la distribución espacial de las labores mineras subterráneas y sus conexiones. Esto se explica por la alteración mecánica de las rocas al extraer el carbón, que genera zonas de doble o triple porosidad y la existencia de caminos preferenciales de flujo parecidos a los observados en acuíferos cársticos.

Para solventar las dificultades descritas son utilizadas las capacidades de integración y procesado de datos de las herramientas SIG, realizándose principalmente tres tareas.

Metodología:

1. Conversión de formatos CAD

Los planos que contienen las labores mineras más modernas se obtienen en formatos CAD (.dxf, .dwg, .dgn). Estos planos serán la base sobre la que se apoyará e implementará toda la información minera restante. La idea es completar la información de estos planos vectoriales, con la información más antigua que no consta en ellos, disponible en formato papel.

No obstante, los formatos CAD no pueden editarse directamente en el SIG. Para ello, es necesario primero convertirlos a formato "Shapefile" (.shp).

El método elegido para realizar proceso de conversión implica la eliminación de los campos de información del CAD origen que no son útiles para su uso en el SIG. A continuación se edita el Shapefile creado y se añaden en su tabla de atributos campos adicionales que inicialmente el CAD no contiene. Estos se utilizarán para introducir datos referentes a las geometrías, como su longitud, área o volumen. La herramienta "Field Calculator" resulta muy útil para conseguir valores de un campo en la tabla de atributos de la geometría, que son calculados en función de otros de la misma tabla.

2. Transformación de coordenadas

El sistema de referencia cartográfico adoptado para este trabajo es el oficial actualmente en España, según lo establecido en el RD 1071/2007. Es decir el Sistema de Referencia Terrestre Europeo 1989 (ETRS89) y la proyección Universal Transversal de Mercator (UTM).

La información topográfica, la ortofotografía y el Modelo Digital de Elevaciones de la zona de estudio, son datos cartográficos básicos obtenidos para la construcción del SIG, a través de la Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y siguen las especificaciones del RD 1071/2007.

Por otra parte, los planos mineros recopilados poseen varios sistemas de referencia distintos, en función de la época a la que pertenecen. Problema bastante común, dado que a lo largo del último siglo en España se han producido varios cambios oficiales de sistema de referencia geodésico y proyección cartográfica.

Así, los planos de labores mineras más modernos, en formato CAD, poseen coordenadas proyectadas UTM y sistema de referencia ED50.

Por otro lado, los planos mineros más viejos están en formatos papel y sus sistemas de referencia o tipo de coordenadas difieren unos de otros. Encontrándose algunos en coordenadas geográficas, proyección Cónica Conforme de Lambert o coordenadas locales.

A fin de homogeneizar bajo un mismo sistema de referencia cartográfico y proyección, los distintos planos que se implementan en el SIG, la herramienta elegida es "Project" de ArcCatalog. Utilizada en este caso, para transformar todos los planos de labores vectoriales obtenidos en el sistema de referencia ED50, al sistema ETRS89. Mediante el uso de una rejilla de transformación geográfica basado en el estándar NTv2.

3. Digitalización de formatos papel.

En cuanto a los planos en formato papel, que recogen las labores mineras más antiguas. Están siendo actualmente digitalizados en formato ráster por empresas especializadas. A medida que el archivo histórico es digitalizado, los planos útiles se integran en el SIG, mediante las herramientas de ArcMap, "Georeferencing" y "Editor". La primera es utilizada para georeferenciar cada plano y la segunda para pasar manualmente las labores contenidas en el ráster al formato vectorial de ESRI "Shapefile" (.shp).

Finalmente, tras convertir los formatos CAD, homogeneizar sus coordenadas y completarlos con la información adicional de los planos ráster. El resultado obtenido se implementa en el SIG, (véase figura 2, página siguiente).

Las tres tareas descritas van a permitir hacer un uso posterior de esta información, más flexible y optimizar su aprovechamiento.

Etapa 2: Conceptualización del problema

El objeto de formular un modelo conceptual hidrogeológico es la identificación y la cuantificación adecuada de los procesos que representan el comportamiento del sistema real. Dado que resulta imposible el conocimiento en detalle, es necesario estudiar y examinar aquellos factores que son más importantes del sistema. Esto implica la simplificación del problema real y la organización de los datos asociados (Anderson & Woessner, 1992).

En este apartado se describen 2 tareas fundamentales de la conceptualización hidrogeológica de la mina subterránea, que implican el uso del SIG y que se basan fundamentalmente en la información minera.

1. Caracterización del volumen y distribución de huecos mineros

Su objeto es cuantificar la capacidad de almacenamiento de agua en el interior de los huecos de la mina y su distribución espacial para la evaluación del recurso.

Teniendo en cuenta que un gran volumen de almacenamiento de agua en el subsuelo se encuentra en los huecos mineros abiertos; una pregunta interesante durante la definición del modelo conceptual es:

¿Cuál es la distribución espacial y volumetría de los huecos en la mina, susceptibles de almacenar agua?

Contestar esta pregunta implica hacer una consulta a la base de datos SIG. Para ello son utilizados los planos de labores previamente almacenados en la base de datos del SIG, así como la información asociada a cada geometría, en este caso la sección transversal, la longitud y el volumen calculado de cada geometría individual (véase tabla III).

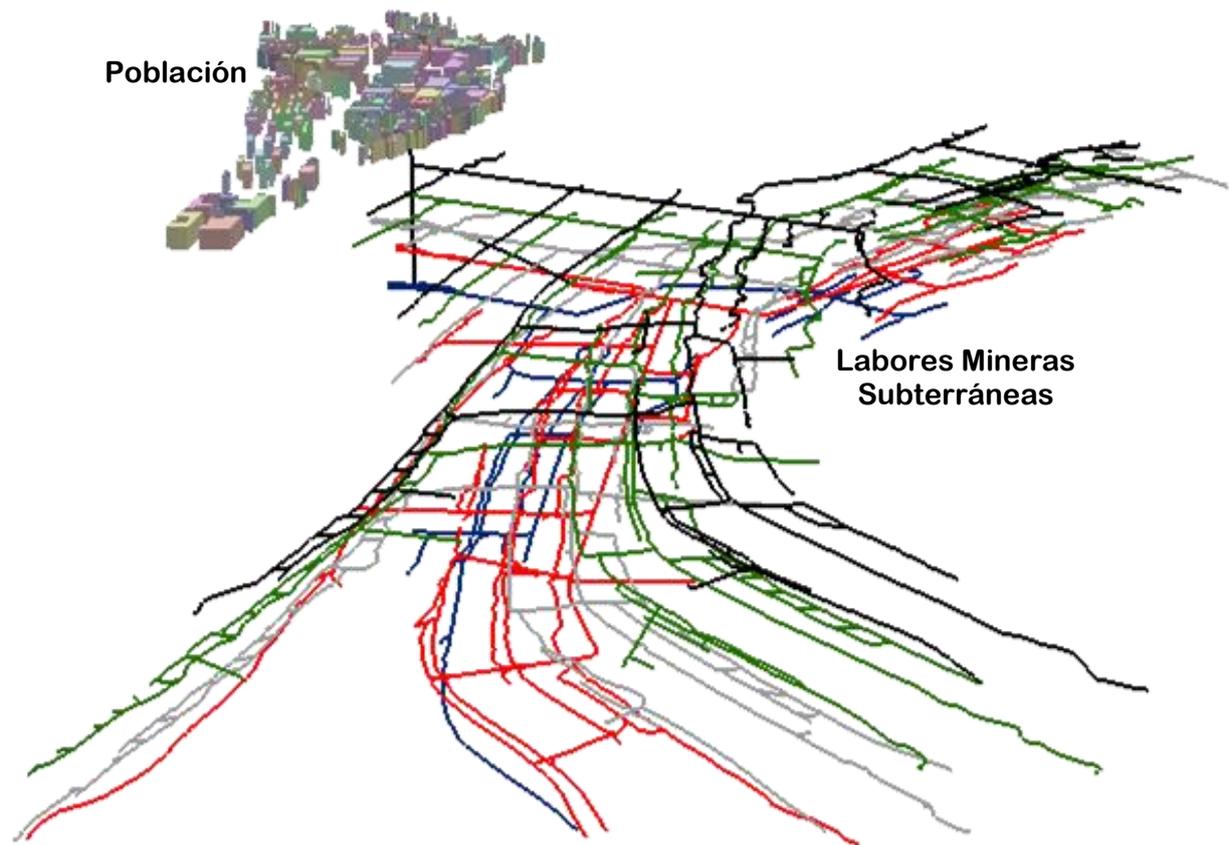


Figura 2–Vista tridimensional en ArcScene de las labores mineras subterráneas. (ArcScene three-dimensional view of underground mine)

Tabla III – Atributos utilizados para la consulta.
(Used attribute for consultation)

ObjetID	Layer	Distance	Section	Volumen
.....

Con este método se obtienen el volumen total de huecos de la infraestructura de la mina, las volúmenes parciales por zonas de una misma planta y el volumen de huecos por plantas.

A modo de ejemplo, se muestra en la tabla IV el volumen de huecos por plantas y el gráfico correspondiente en la figura 3.

Tabla IV – Consulta (Consultation)

ObjetID	Layer	Sum_Volumen
1	Planta 1	216130
2	Planta 2	264650
3	Planta 3	255900
4	Planta 4	239165
5	Planta 5	105854

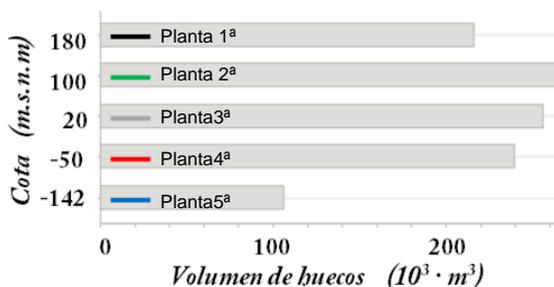


Figura 3–Gráfico de volúmenes de la mina por plantas.
(Volumetric graphic by mine plants)

Las herramientas SIG útiles en este caso son “Sumarize” y “Create Graph Wizard” de ArcMap, ambas actúan sobre los datos

asociados a estas geometrías y permiten obtener tablas y gráficos de consultas sobre ellos.

2. Estimación de zonas de alteración

Las minas de carbón subterráneas, producen en su entorno geológico el fenómeno de subsidencia (Rodríguez Díez, 1999), que genera una zona de alteración mecánica de las rocas, con fracturas y hundimientos que se propagan desde las labores mineras subterráneas hacia la superficie del terreno. Este fenómeno produce cambios en las propiedades y parámetros hidrogeológicos originales de las rocas afectadas y por ello es relevante en la conceptualización del problema estudiado, de manera que la zona minada estará compuesta por un sistema complejo de huecos y zonas de alta permeabilidad asociadas. Todo ello en un contexto de rocas de baja permeabilidad que continúan siendo los límites de la zona minada.

El uso del SIG en esta etapa tiene como objetivo definir zonaciones de parámetros hidrogeológicos en los materiales, en función de la alteración por subsidencia. La aproximación geométrica realizada permite definir esta zonación asumiendo que es conocido el ángulo límite de la cubeta de subsidencia (Rodríguez Díez, 1999) y la posición de los huecos. Sin embargo, debe advertirse que se trata de una simplificación conceptual (figura 4, página siguiente) y que la zonación real es mucho más compleja que la obtenida por este método.

La herramienta SIG utilizada es el “Buffer”, capaz de trazar geoméricamente zonas de influencia en torno a una geometría, conocida la distancia o radio de influencia. La limitación de esta herramienta es su bidimensionalidad (2D), es decir calcula y traza áreas o superficies, pero el problema abordado es tridimensional (3D). El método utilizado para solventar la limitación 2D se basa en la obtención de secciones horizontales del volumen de roca alterada a distinta cota, partiendo del dato conocido de la geometría del hueco minero. Para ello se procede insertando en la tabla de atributos de la geometría de partida nuevos campos que contienen la información necesaria para hacer operativa la herramienta

buffer, según el esquema planteado en la figura 4. Los nuevos datos asociados a la geometría del hueco son los radios de influencia “buffer” (Buffer_{Z_n}) y la cota (Z_n) a la que corresponde cada buffer (véase Tabla V).

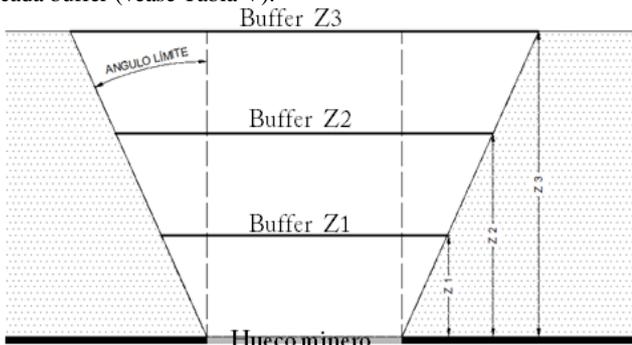


Figura 4 - Perfil esquemático del método de cálculo de zonas de alteración mediante buffers a distinta cota. (Schematic profile of the method of alteration zones calculation using buffer at different height).

Tabla V – Campos añadidos en la tabla de atributos

Z1	Buffer_Z1	Z2	Buffer_Z2	Z3	Buffer_Z3
....

Los registros del campo con la cota de cada buffer son introducidos manualmente y conservados en la tabla de atributos del buffer calculado para posicionar posteriormente esta geometría en el modelo de simulación a la cota correcta.

Por otra parte el campo con el radio de influencia del buffer será calculado para cada cota definida, en función del ángulo límite de la cubeta de subsidencia (véase figura 4) mediante la ecuación:

$$\text{Buffer}(Z_n) = (Z_n - Z_0) * \tan \gamma$$

Donde:

Buffer (Z_n) es el radio del buffer calculado para la cota Z_n

Z_n es la cota por encima del hueco

Z₀ es la cota del hueco para el cual se calcula la zona de alteración

γ es el ángulo límite de la cubeta de subsidencia

Con carácter general, el SIG también ha sido útil en esta etapa de conceptualización para:

- Demarcación de cuencas y redes hidrográficas a partir del Modelo Digital de Elevaciones.
- Localización espacial de puntos de agua asociados a series temporales de medición y el análisis gráfico de los datos.
- Representación de la cartografía geológica y la obtención de mapas de isobatas.
- Cálculo de la distribución espacial de la recarga a partir de los datos puntuales de estaciones meteorológicas y el MDE.
- Gestión mediante hipervínculos georreferenciados de información minera cualitativa o gráfica.

Etapa 3: Modelización numérica.

Los modelos de simulación numéricos utilizados en hidrogeología, son aproximaciones y simplificaciones que se crean partiendo de un modelo conceptual y describen un fenómeno natural de manera simplificada, proporcionando soluciones aproximadas de las ecuaciones que los gobiernan en todo su dominio espacial. El simulador elegido para este trabajo es FEFLOW, un código numérico basado en el método de elementos finitos que permite la modelización tridimensional de flujo y transporte de calor.

En este apartado se describen algunas de las tareas realizadas con ArcGIS que son útiles durante el proceso de modelización con el simulador FEFLOW.

En primer lugar se evaluarán someramente las capacidades y limitaciones de intercambio de archivos entre ambos, las posibilidades que plantea el uso del SIG para definir la geometría del modelo, las condiciones de contorno y la distribución de parámetros en el proceso de construcción del modelo.

En segundo lugar se describen las capacidades del SIG, para la gestión y el análisis de los resultados de simulación.

1. Construcción del modelo

Con ayuda del SIG se creará la geometría del dominio tridimensional del modelo, haciendo uso de archivos que previamente han sido almacenados en la base de datos del SIG.

Los datos utilizados son:

- El polígono (.shp) que define la extensión superficial del modelo conceptual y sus límites laterales.
- El MDE de la zona.
- El Mapa de Isobatas (en adelante MI) de una formación geológica profunda, considerada impermeable.

La metodología empleada consiste en primer lugar en emplear los datos correspondientes al polígono para definir los límites del modelo de simulación.

A continuación se utiliza el MDE para definir la parte superior del modelo y el MI para definir la parte inferior. En ambos casos se parte de datos en formato ráster que FEFLOW no puede utilizar directamente.

El método para utilizar los datos ráster en la construcción del modelo consiste en procesarlos previamente con herramientas SIG y obtener una malla de puntos en formato vectorial con los datos del ráster asociados en su tabla de atributos. Para ello se utiliza el polígono que delimita la extensión del modelo y las herramientas SIG “Polygon to Raster” y “Raster to Point”. Luego con la herramienta “Extract Multi values to points” en esos puntos (x, y), se extraen las cotas (z) tanto del MDE como del mapa de isobatas, añadiéndose esta información de los ráster a la tabla de atributos del archivo de puntos. El archivo de puntos es almacenado en la base de datos y a continuación es importado desde simulador mediante el menú de intercambio de datos. Finalmente con la ayuda de los interpoladores del simulador se construyen las superficies inferior y superior del modelo, como se muestra en la figura 5 donde se define la geometría global del sistema modelizado.

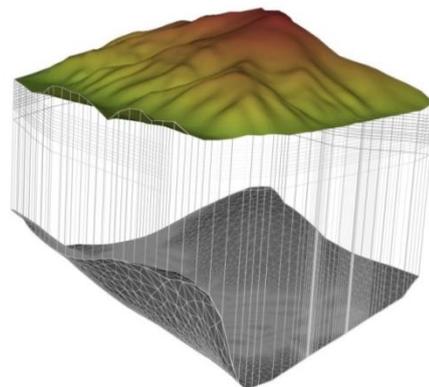


Figura 5 - Vista en FEFLOW de las superficies superior e inferior del modelo. (FEFLOW view of top and bottom model surface).

En cuanto a la geometría interna del modelo, está principalmente caracterizada por la estructura de la mina.

En este aspecto, los planos de labores previamente tratados y descritos en la Etapa 1 son importados al simulador para definir la estructura de la mina. Debe de tenerse en cuenta que juegan un papel importante desde el principio de la construcción del modelo, puesto que han de ser considerados al generar el mallado de elementos finitos haciendo que la discretización se adapte a las geometrías de los planos de labores. Esto es necesario para construir posteriormente y caracterizar los huecos en la posición espacial que les corresponde dentro del modelo. Los planos de labores también llevan asociados además los valores de

propiedades que caracterizan hidrogeológicamente las distintas partes que ocuparán dentro del modelo. Esta metodología de construcción se muestra especialmente ventajosa cuando es utilizada junto con la herramienta “Discrete Features” de FEFLOW para simular el flujo subterráneo en las galerías de la mina. Permitiendo la configuración rápida del modelo de simulación enlazando los datos del archivo de planos de labores con los parámetros que alimentan al simulador.

La distribución de parámetros hidrogeológicos del modelo, referente a la mina, se completa con la utilización de las zonas buffer obtenidas para la extensión de terreno alterada, ya descritos en la Etapa 2.

En cuanto a las condiciones de contorno, los datos procesados de la distribución de recarga en la superficie del modelo, serán la única condición de contorno introducida mediante herramientas SIG. Para ello es necesario -como en el caso del MDE y MI- extraer la información de formatos ráster a un archivo vectorial de puntos o polígonos y luego utilizar el dialogo de intercambio de FEFLOW para introducir los valores de la recarga en la superficie del modelo.

2. Resultados de simulación

Una de las utilidades que ofrece el SIG para el análisis de resultados de simulación, es su capacidad para operar sobre datos extraídos del simulador y compararlos o visualizarlos.

Dos ejemplos claros de la utilidad que representan para el análisis del problema planteado son:

- Cálculo de números de Reynolds

Obtener la distribución de R_e en el dominio del modelo ayuda a determinar los lugares del modelo donde los flujos son turbulentos. Es decir, aquellos lugares donde la velocidad del flujo es elevada y la aplicación de la ley de Darcy es problemática.

En el aspecto de la geotermia este también es un dato relevante, puesto que la transferencia de calor en las galerías de la mina con régimen turbulento es diferente a cuando el régimen es laminar (Rodríguez & Díaz, 2009).

Los datos de partida para esta tarea se obtienen del simulador, y consisten en valores puntuales de la velocidad de Darcy en los nodos del dominio del modelo. Para obtener los números de Reynolds a partir de los datos de velocidades, se exportan estos al SIG en formatos Shapefile de tipo punto y con ayuda de la calculadora de campos “Field Calculator” se obtiene el valor del número de Reynolds asociado a cada zona del modelo, según la ecuación:

$$R_e = \frac{V_R \cdot d \cdot \rho}{\mu}$$

Dónde:

- V_R es la velocidad real de flujo
- d es el diámetro medio de los poros
- ρ es la densidad del agua
- μ es la viscosidad del agua

El resultado se representa en mapas con ayuda de interpoladores para identificar de manera fácil las zonas de turbulencia, las zonas de flujo laminar y las zonas de transición dentro del modelo, como muestra el ejemplo de la figura 6.

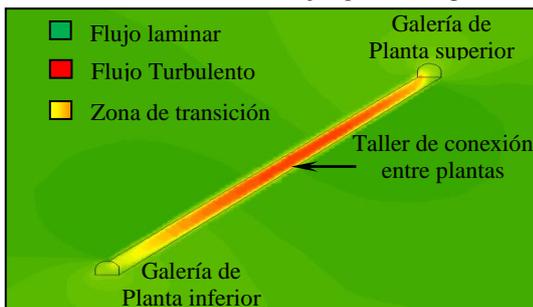


Figura 6 – Vista de perfil. Ejemplo de flujo turbulento en la simulación de conexiones entre plantas de la mina. (Profil view. Example of turbulence flow in simulated mine connection by plants).

- Cálculo de tiempos de residencia

En función de las trayectorias de flujo proporcionadas por el simulador FEFLOW, se puede hacer un análisis de los tiempos de residencia del agua dentro de la mina y conseguir tablas, gráficos y mapas que representen la distribución de esta variable del problema a nivel general o parcial.

Preguntas que cabe hacerse, y son relevantes para la caracterización geotérmica de la mina son por ejemplo:

¿Cuál es el tiempo medio de residencia del agua en la planta más profunda del pozo minero?

La respuesta se puede obtener mediante el uso del SIG con una selección de datos por localización con la herramienta “Select by location” y el análisis estadístico de los datos seleccionados con la herramienta “Statistics”.

¿Cuáles son las zonas de la mina donde el agua permanece menos tiempo, hasta que es bombeada al exterior?

La respuesta en este caso se obtiene de manera gráfica en forma de mapa, como muestra la figura 7.

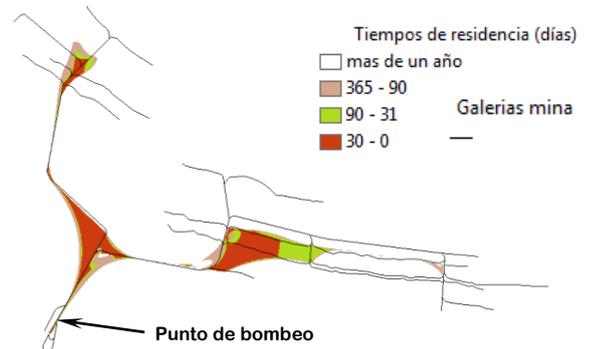


Figura 7 – Mapa de tiempos de residencia para una planta de la mina subterránea (Residence times map of underground mine plant.)

Para este tipo de representación es utilizada la herramienta SIG de análisis espacial “Interpolation”.

3. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las tareas descritas en el apartado anterior, son un ejemplo de las múltiples posibilidades que pueden ofrecer las herramientas SIG. Sin embargo, sirven para ilustrar algunas de las ventajas y las limitaciones que presentan.

En la Etapa 1: Recopilación, análisis y valoración de información (véase 2. Métodos y Materiales) se han visto las capacidades del SIG para convertir y editar formatos vectoriales, georreferenciar formatos ráster y homogeneizar datos con sistemas de referencia distintos. También se ha comentado la capacidad para almacenar todos los datos de manera coherente en una base de datos espacial.

Estas capacidades se perfilan como una de las principales ventajas de trabajar con el SIG, ya que permiten gestionar y analizar información durante la conceptualización y modelización hidrogeológica de una forma sin precedentes. Esto se explica también gracias al enfoque conciliador del código numérico de simulación FEFLOW, que ofrece menús de intercambio de datos adaptados a formatos típicos de herramientas SIG como son: (.shp) o (.dbf).

Se ha descrito también, como se pueden realizar transformaciones de datum ED50 - ETRS89 de manera muy sencilla. Sin embargo, transformaciones cartográficas comunes en España como la de Proyección Cónica Conforme de Lambert a UTM, son complejas de realizar con ArcGIS y es necesario poseer conocimientos avanzados de cartografía.

Debe destacarse que tareas de integración de información con similar problemática pueden estar implícitas en estudios de hidrogeología minera de cualquier parte del mundo. Donde la tradición minera propicie la existencia de cantidades importantes

de datos dispersos difícil cohesión (ESRI, 2006). Por ello estas tareas pueden ser consideradas como la parte inicial de una metodología cuyo objetivo es afrontar el estudio de este tipo de entornos.

En la Etapa 2: Conceptualización del problema (véase 2. Métodos y Materiales), se describen a modo de ejemplo dos tareas orientadas a la definición del modelo conceptual, que presentan resultados óptimos desde el punto de vista operativo. Es decir, en el caso de la caracterización de volúmenes de huecos mineros, el tiempo necesario para obtener resultados con el SIG, es realmente bajo en comparación con el tiempo necesario para obtener los mismos resultados con herramientas CAD u hojas de cálculo. También es destacable, la capacidad para realizar consultas espaciales sobre los elementos de la mina y la facilidad para graficar los resultados de las mismas, una ventaja exclusiva del SIG.

En cuanto a la estimación de zonas de alteración, el método y herramientas propuestas se adaptan a la conceptualización pero presentan limitaciones claras para un desarrollo más complejo de la geometría, principalmente debido a la bidimensionalidad operativa de las herramientas buffer. No obstante, esta limitación del SIG concuerda en muchos aspectos con las limitaciones geométricas y constructivas del simulador de elementos finitos utilizado, FEFLOW, por lo que no supone realmente una limitación en la modelización.

En la Etapa 3: Modelización numérica (véase 2. Métodos y Materiales) las tareas descritas permiten ilustrar las capacidades del SIG para la definición de dominios de simulación, mostrándose como una herramienta muy útil para el tratamiento de los datos necesarios y en evidente detrimento de otras herramientas muy extendidas entre los usuarios como Surfer, Hydrogeobuilder o Leapfrog. Un punto a destacar en el aspecto constructivo del modelo son las herramientas de medición que ofrece ArcMap, ya que FEFLOW carece de ellas. Por lo que el SIG es un complemento perfecto para el simulador desde esa perspectiva, en ocasiones imprescindible. Cítese como ejemplo la necesidad de medir áreas concretas del modelo –que FEFLOW no puede medir– para implementar adecuadamente condiciones de contorno cuyo valor de cómputo en el modelo es proporcional al área en la que se aplican.

Otra conclusión clara de la fase constructiva del modelo es que la definición de la geometría del modelo o las condiciones de contorno, de manera versátil y rápida queda supeada a la utilización adecuada de formatos SIG, principalmente Shapefile.

Finalmente, una de las tareas más laboriosas para el modelista consiste en el análisis de los datos de simulación tras ejecutar los modelos de simulación. La conclusión en este último aspecto es que las herramientas SIG facilitan la tarea de comparación de datos de distintas simulaciones, también el procesado de piezometrías, velocidades, presiones y líneas de flujo o la realización de operaciones sobre estos datos. Las tareas descritas al respecto son el cálculo del número de Reynolds en las zonas de la mina o la distribución de tiempos de residencia. Ambos resultados muy relevantes en el estudio del comportamiento térmico del sistema de flujo de la mina, pero no dejan de ser una pequeña muestra de las múltiples posibilidades existentes.

4. LINEAS FUTURAS DE TRABAJO

Tras haber cubierto las primeras fases de modelización del proyecto, se plantean dos líneas distintas en las cuales el SIG tendrá un peso relevante.

La primera de ellas es la aplicación del análisis de redes de ArcGIS para el estudio de los flujos en la infraestructura de huecos subterráneos de la mina y sus conexiones.

Por otro lado se estudia el uso conjunto de los datos de volumetría y evolución de niveles en la inundación de la mina para la estimación de coeficientes de almacenamiento de los materiales. Dato imprescindible para las simulaciones en régimen transitorio.

Sin embargo, para este estudio deben de ser conocidos también los valores de la recarga neta en la mina, lo que supone un problema adicional que está siendo estudiado actualmente. En esa línea se trabaja en primer lugar mediante la implementación de una red de sensores más densa para la mejor cuantificación de las variables meteorológicas de la zona, dado que la recarga de agua a la mina es principalmente debida a las precipitaciones.

5. REFERENCIAS

- Alonso, A. O., Arias, C. A., Jardón, S., García, R. A., Fernández, F. P., and Pérez, J. L. (2008): "Aprovechamiento de las Aguas subterráneas como recurso hídrico y energético". *Investigación 2008*. Fundación Mapfre. p.156.
- Anderson, M. P. and Woessner, W. W. (1992): "Applied Groundwater Modeling. Simulation of Flow and Advective Transport". Academic Press Inc. San Diego. p. 381.
- Arnold, T., and Luinstra, B. (2009): "FEFLOW for science-based water protection: A watershed manager perspective". *2nd International FEFLOW User Conference*. Berlin/Potsdam, Germany.
- Arranz González, J. C. (2008): "Los proyectos de ordenación Minero-Ambiental realizados por el IGME". *Seminario: Evaluación y recuperación ambiental de espacios mineros. Pasivos ambientales mineros*. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. p.39.
- Ashaf, A., & Ahmad, Z. (2006): "Integrated use of GIS, Remote Sensing and Groundwater Modeling through FEFLOW to study the Aquifer behavior of Upper Chaj Doab of Indus Basin Pakistan". *International FEFLOW User Conference*. Berlín, Germany. p. 29–37.
- Banks, C. E., McDonald, J., Crowell, D. L., and Wickstrom, L. H. (2004): "Development of Abandoned Underground Mines (AUM) GIS". *4th Technical Forum: Geologic Hazards Impacting Transportation Systems in the Appalachian Region*. Ohio, USA.
- Batelaan, O., and De Smedt, F. (2007): "GIS-based recharge estimation by coupling surface–subsurface water balances". *Journal of Hydrology*, **337**, 3–4, 337–355.
- Betancur V., T., Palacio T., C. A., and Escobar M., J. F. (2012). "Conceptual Models in Hydrogeology, Methodology and Results". *Hydrogeology. A global perspective*. Dr. Gholam A. Kazemi (Ed.) InTech, 7, 203–222.
- Cacace, M., Kaiser, B. O., Lewerenz, B., and Scheck-Wenderoth, M. (2010): "Geothermal energy in sedimentary basins: What we can learn from regional numerical models". *Chemie der Erde*, **70**, S3, 33–46.
- Carranza, E. J. M., Wibowo, H., Barritt, S. D., and Sumintadireja, P. (2008): "Spatial data analysis and integration for regional-scale geothermal potential mapping, West Java, Indonesia". *Geothermics*, **37**, 3, 267–299.
- Carrera-Hernández, J. J., and Gaskin, S. J. (2007): "The Basin of Mexico aquifer system: regional groundwater level dynamics and database development". *Hydrogeology Journal*, **15**, 8, 1577–1590.
- Chenini, I., and Ben Mammou, A. (2010): "Groundwater recharge study in arid region: An approach using GIS techniques and numerical modeling". *Computers & Geosciences*, **36**, 6, 801–817.
- Córdoba, D. (2012): "Utilización de las herramientas de información geográfica para la integración de modelos hidrogeológicos". *Proyectos 2012: Master Universitario en hidrología y gestión de recursos hídricos. Universidades de Alcalá y Rey Juan Carlos*, 47–75
- Diersch, H. J. G. (1993): "Computational aspects in developing an interactive 3D groundwater transport simulator using FEM and GIS". *Proceeding of the Groundwater Quality Management (GQM) Conference*. Tallinn, Estonia, 313–326
- Düzgün, Ş., Künzer, C., and Özgen Karacan, C. (2011): "Applications of remote sensing and GIS for monitoring of coal fires, mine subsidence, environmental impacts of coal-mine closure and reclamation". *International Journal of Coal Geology*, **86**, 1, 1–2.
- ESRI. (2006): "GIS best practices. Mining", Environmental Systems Research Institute (ESRI), Vol. 1.
- ESRI. (2013): Environmental Systems Research Institute. Retrieved from <http://www.esri.com/software/arcgis/geodatabase/single-user-geodatabase>
- Fang, K., Model, P. B., and Yiqin, X. (2008): "Gis network analysis in rescue of coal mine". *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **37**, B8, 357–360.
- Fürst, J., Girstmair, G., and Nachtnebel, H. P. (1993): "Applications of GIS in Decision Support Systems for groundwater management".

Proceedings of the Viena Conference HydroGIS 93: Applications of Geographic Information Systems in Hydrology and water Resources. IAHS, **211**, 13–21.

- Garzón, E., García, I. G., Sánchez-Soto, A. and Ruiz-Conde, P. (2009): "Aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la prospección y caracterización de materias primas de interés en Cerámica y Vidrio". *Boletín de la Sociedad española de Cerámica y Vidrio*, **48**, 1, 39–44.
- Gemelli, A., Mancini, A. and Longhi, S. (2011): "GIS-based energy-economic model of low temperature geothermal resources: A case study in the Italian Marche region". *Renewable Energy*, **36**, 9, 2474–2483.
- Gogu, R., Carabin, G., Hallet, V., Peters, V. and Dassargues, A. (2001): "GIS-based hydrogeological databases and groundwater modelling". *Hydrogeology Journal*, **9**, 6, 555–569.
- Goodchild, M. F. (1993): "The state of GIS for Environmental Problem-Solving". *Environmental Modeling with GIS*. Oxford University Press, p. 488.
- Heredia, J., Martín-Loeches, M., Olmo, C. Del, Rosino, J. and Lucini, M. (2001): "Síntesis Hidrogeológica y modelización regional de la cuenca media del Tajo, asistida por un SIG". *Estudios Geológicos*, **57**, 31–46.
- Higuchi, S., Nishijima, J. and Fujimitsu, Y. (2013): "Integration of Geothermal Exploration Data and Numerical Simulation Data using GIS in a Hot Spring Area". *Procedia Earth and Planetary Science*, **6**, 177–186.
- Højberg, A. L., Trolldborg, L., Stisen, S., Christensen, B. B. S. and Henriksen, H. J. (2013): "Stakeholder driven update and improvement of a national water resources model". *Environmental Modelling & Software*, **40**, 202–213.
- Jardón Palacio, J. S. (2010): "Aprovechamiento de las Aguas subterráneas como recurso hídrico y energético. Aplicación al embalse minero Barredo-Figaredo". Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo. Departamento de Explotación de Minas.
- Juan, C. S. and Kolm, K. E. (1996): "Conceptualization, characterization and numerical modeling of the Jackson Hole alluvial aquifer using ARC/INFO and MODFLOW". *Engineering Geology*, **42**, 119–137.
- Korose, C. P., Louchios, A. G. and Elrick, S. D. (2009): "The Proximity of Underground Mines to Urban and Developed Lands in Illinois". University of Illinois. Institute of Natural resource Sustainability. Illinois State Geological Survey. Circular 575, p.19.
- Lachaal, F., Mlayah, A., Bédir, M., Tarhouni, J. and Leduc, C. (2012): "Implementation of a 3-D groundwater flow model in a semi-arid region using MODFLOW and GIS tools: The Zéramdine-Béni Hassen Miocene aquifer system (east-central Tunisia)". *Computers & Geosciences*, **48**, 187–198.
- Latre, M. Á., Álvarez, P., Cantán, Ó., Noguera, J. and Bañares, J. Á. (2001): "SIGEMCA: Sistema de Información Geológico-Minero Distribuido con capacidad SIG". *Sistemas de Información geográfica: una aproximación desde la ingeniería del software a las bases de datos*. Fundación Dintel. Madrid.
- Li, M., Zhang, X., Mao, S. and Liu, Q. (2009): "Study of deep mining safety control decision making system". *Procedia Earth and Planetary Science*, **1**, 1, 377–383.
- Malekmohammadi, B., Ramezani Mehrian, M. and Jafari, H. R. (2012): "Site selection for managed aquifer recharge using fuzzy rules: integrating geographical information system (GIS) tools and multi-criteria decision making". *Hydrogeology Journal*, **20**, 7, 1393–1405.
- Malinowska, A. and Hejmanowski, R. (2010): "Building damage risk assessment on mining terrains in Poland with GIS application". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **47**, 2, 238–245.
- Martinez-Estrella, I., Torres, R. J. and Iglesias, E. R. (2005): "A GIS-Based Information System for Moderate- to Low-Temperature Mexican Geothermal Resources". *Proceedings of World Geothermal Congress*. Antalya, Turkey, 24–29.
- Masoud, M. H., Schneider, M. and El Osta, M. M. (2013): "Recharge flux to the Nubian Sandstone aquifer and its impact on the present development in southwest Egypt". *Journal of African Earth Sciences*, **85**, 115–124.
- Méndez, C. A. O., Armenta, M. F. and Silva, G. R. (2011). "Potencial geotérmico de la República Mexicana". *Revista mexicana de geoenergía*, **24**, 1, 50–58.
- Nam, Y. and Ooka, R. (2011): "Development of potential map for ground and groundwater heat pump systems and the application to Tokyo". *Energy and Buildings*, **43**, 2-3, 677–685.
- Noorollahi, Y., Itoi, R., Fujii, H. and Tanaka, T. (2007): "GIS model for geothermal resource exploration in Akita and Iwate prefectures, northern Japan". *Computers & Geosciences*, **33**, 8, 1008–1021.
- Noorollahi, Y., Itoi, R., Fujii, H. and Tanaka, T. (2008): "GIS integration model for geothermal exploration and well siting". *Geothermics*, **37**, 2, 107–131.
- Oh, H.-J. and Lee, S. (2010): "Assessment of ground subsidence using GIS and the weights-of-evidence model". *Engineering Geology*, **115**, 1-2, 36–48.
- Oh, H.-J. and Lee, S. (2011): "Integration of ground subsidence hazard maps of abandoned coal mines in Samcheok, Korea". *International Journal of Coal Geology*, **86**, 1, 58–72.
- Ondreka, J., Rüsgen, M. I., Stober, I. and Czurda, K. (2007): "GIS-supported mapping of shallow geothermal potential of representative areas in south-western Germany—Possibilities and limitations". *Renewable Energy*, **32**, 13, 2186–2200.
- Pasiakos, G., Moutsika, D., Chalari, A. and Kapageridis, I. (2007): "Design and Visualisation of Underground Workings Using Information from Multiple Sources". proceedings of 11 th ACUUS Conference: Underground Space: Expanding the Frontiers, Athens-Greece, 417–422.
- Prol-Ledesma, R. (2000): "Evaluation of the reconnaissance results in geothermal exploration using GIS". *Geothermics*, **29**, 1, 83–103.
- Rodríguez Díez, R. (1999): "Subsistencia en la explotación de capas de carbón inclinadas y verticales. Teoría de la múltiple cubeta de hundimiento y modelo de predicción mediante funciones de perfil". Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo. Departamento de Explotación de Minas.
- Rodríguez, R. and Díaz, M. B. (2009): "Analysis of the utilization of mine galleries as geothermal heat exchangers by means a semi-empirical prediction method". *Renewable Energy*, **34**, 7, 1716–1725.
- Salap, S., Karslioglu, M. O. and Demirel, N. (2010): "A GIS-based Management System for Underground Mining Safety: A Practical Approach". LAP LAMBERT Academic Publishing. p.92
- Suñer, J. S. I. (2009): "Los Sistemas de Información Geográfica al servicio de la sociedad". *Cuadernos Internacionales para el desarrollo humano. Tecnología de la Información Geográfica*, **9**.
- Tomas, R., Herrera, G., Lopez-Sanchez, J. M., Vicente, F., Cuenca, A. and Mallorquí, J. J. (2010): "Study of the land subsidence in Orihuela City (SE Spain) using PSI data: Distribution, evolution and correlation with conditioning and triggering factors". *Engineering Geology*, **115**, 1-2, 105–121.
- Tüfekçi, N., Lütfi Süzen, M. and Güleç, N. (2010): "GIS based geothermal potential assessment: A case study from Western Anatolia, Turkey". *Energy*, **35**, 1, 246–261.
- Watzlaf, G. R. and Ackman, T. E. (2006): "Underground Mine Water for Heating and Cooling using Geothermal Heat Pump Systems". *Mine Water and the Environment*, **25**, 1, 1–14.
- Wycisk, P., Hubert, T., Gossel, W. and Neumann, C. (2009): "High-resolution 3D spatial modelling of complex geological structures for an environmental risk assessment of abundant mining and industrial megasites". *Computers & Geosciences*, **35**, 1, 165–182.
- Yenilmez, F., Kuter, N., Emil, M. K. and Aksoy, A. (2011): "Evaluation of pollution levels at an abandoned coal mine site in Turkey with the aid of GIS". *International Journal of Coal Geology*, **86**, 1, 12–19.
- Yousefi, H., Noorollahi, Y., Ehara, S., Itoi, R., Yousefi, A., Fujimitsu, Y. and Sasaki, K. (2010): "Developing the geothermal resources map of Iran". *Geothermics*, **39**, 2, 140–151.

