

# The water budget and modeling of the Montes Torozos' karst aquifer (Valladolid, Spain)

Germán Sanz-Lobón <sup>a</sup>, Roberto Martínez-Alegría <sup>b</sup>, Javier Taboada <sup>c</sup>, Teresa Albuquerque <sup>d</sup>, Margarida Antunes <sup>e</sup> & Isabel Montequi <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, Brasil. [gsl9384@yahoo.com](mailto:gsl9384@yahoo.com)

<sup>b</sup> Escuela Politécnica, Universidad Europea Miguel de Cervantes, Valladolid, España. [rmartinez@uemc.es](mailto:rmartinez@uemc.es)

<sup>c</sup> Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Minas, Universidad de Vigo, Vigo, España. [jtaboada@uvigo.es](mailto:jtaboada@uvigo.es)

<sup>d</sup> Escola Superior de Tecnologia, Instituto Politécnico de Castelo Branco, Castelo Branco, Portugal. [teresal@ipcb.pt](mailto:teresal@ipcb.pt)

<sup>e</sup> Escola Superior Agrária, Instituto Politécnico de Castelo Branco, Castelo Branco, Portugal. [imantunes@ipcb.pt](mailto:imantunes@ipcb.pt)

<sup>f</sup> Escuela Politécnica, Universidad Europea Miguel de Cervantes, Valladolid, España. [imontequi@uemc.es](mailto:imontequi@uemc.es)

Received: August 02<sup>nd</sup>, 2014. Received in revised form: December 10<sup>th</sup>, 2014. Accepted: May 6<sup>th</sup>, 2015.

## Abstract

The main core of this paper is the computation of the hydrological balance for the karstic aquifer of the sedimentary Duero watershed, middle-west of Spain. The obtained results for the hydrological balance have been used in the construction of simulated scenarios. In order to characterize the spatial and temporal dynamics of the water resources evolve through the hydrological year geostatistical (SpaceStat software) and numerical methodologies (Visual Modflow, software) were carried out. The Montes Torozos is a sedimentary karst unconfined aquifer, and its hydrological balance is defined by rainfall and drains.

**Keywords:** karst aquifer, hydrologic model, groundwater flow, kriging and sustainability.

# Balance y modelización del acuífero karstico de los Montes Torozos (Valladolid, España)

## Resumen

En este trabajo se presenta el balance hídrico de una masa de agua subterránea de naturaleza kárstica de la cuenca sedimentaria del Duero, centro oeste de España. Los datos obtenidos para la realización del balance han sido introducidos en una herramienta de simulación con el fin de conocer la evolución temporal de los recursos hídricos a lo largo del año hidrológico. Para ello se ha sido necesario recurrir a la utilización de técnicas geostatísticas y el programa Visual Modflow. La masa de agua de los Montes Torozos se trata de un acuífero kárstico libre y colgado de origen sedimentario, y su balance está determinado por las precipitaciones y por el drenaje.

**Palabras clave:** acuífero kárstico modelo hidrogeológico, flujo subterráneo, kriging y sostenibilidad.

## 1. Introducción

Este trabajo se fundamenta en la necesidad de conocer y cuantificar el recurso hídrico. El principal objetivo es determinar el volumen de los recursos de la masa de agua del Páramo de los Montes Torozos, delimitada en el plan Hidrológico de la Cuenca del Duero de 2009 (código 400032) [1]. Se trata de una aproximación numérica al modelo hidrometeorológico de un acuífero kárstico.

Partiendo de la descripción geométrica del acuífero se han descrito y analizado sus características cualitativas y cuantitativas, y se ha establecido su dinámica y evolución a lo largo del año hídrico.

La base de esta caracterización es el balance hídrico, y a partir de él, se han determinado las entradas (aportaciones) y las salidas (extracciones), que condicionan el régimen del acuífero, los volúmenes de recursos y las reservas disponibles. Usando como base de conocimiento los principios

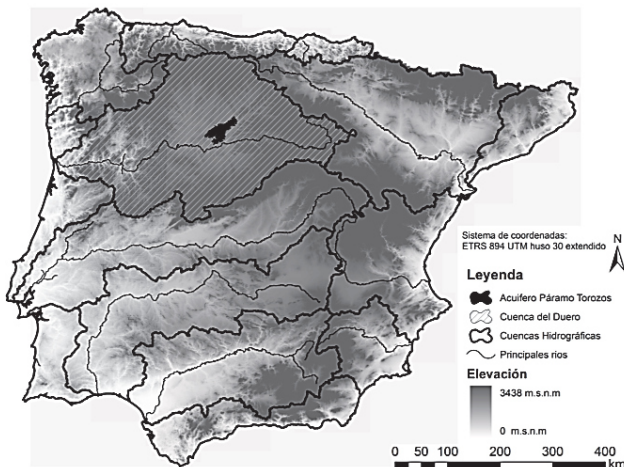


Figura 1. Localización del páramo de los Montes Torozos.  
Fuente: el autor.

teóricos fundamentales de: la teoría elemental del flujo de agua en los medios porosos (Ley Darcy), y la Hidráulica de Captaciones [2].

La masa de agua del Páramo de los Montes Torozos se localiza dentro de la cuenca del Duero y se extiende por las provincias de Valladolid y Palencia, ocupando una superficie de unos 1000 km<sup>2</sup> (Fig. 1).

La zona de estudio posee un clima mediterráneo con una temperatura media de 11.14°C, una precipitación de 456 mm/año y una evapotranspiración de 312 mm/año seco [3]. Lo que supone un balance hídrico próximo a los 144 mm/año de lluvia útil capaz de alcanzar el acuífero.

## 2. Material y método

La caracterización de todas las variables ambientales ha permitido obtener una visión holística a partir de la cual se pueda estimar el balance hídrico y el régimen de usos del acuífero de los Montes Torozos, como soporte esencial de cualquier actividad antrópica. Para ello, partiendo de un

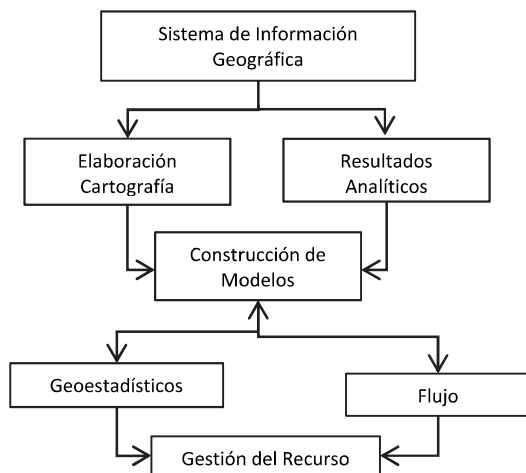


Figura 2. Gráfico de la propuesta metodológica desarrollada.  
Fuente: el autor.

Sistema del Información Geográfico, se ha planteado un método de trabajo pluridisciplinar, basado en un proceso continuo de obtención y análisis de datos que permita la creación de un modelo hídrico válido de acuerdo a la siguiente metodología (Fig. 2).

La metodología desarrollada se ha apoyado en herramientas informáticas que faciliten la visualización, y por tanto la interpretación de los resultados obtenidos.

Para el análisis geostatístico se ha utilizado el programa Space-Stat. Posteriormente sus resultados se han exportado a un Sistema de Información Geográfica (SIG) implementado sobre la plataforma de ArcGis; a partir de la cual se ha creado, editado y procesado toda la información cartográfica necesaria para construir el modelo de flujo en Visual Modflow.

## 3. Antecedentes

El cálculo del balance hídrico de un acuífero (o masa de agua), así como la realización de modelos de comportamiento y predictivos son herramientas habituales en la gestión de los recursos hídricos. Para su construcción se requiere una serie de pasos previos, como son: la delimitación espacial del acuífero, el establecimiento de sus límites, y el procesamiento de los datos piezométricos y climáticos. Respecto a la delimitación geográfica e hidrogeológica se ha realizado de acuerdo con lo descrito por la Confederación Hidrológica del Duero (CHD) [1]. La piezometría fue calculado mediante técnicas geoestadísticas de tipo kriging [4]. Para la síntesis de los datos climáticos se usaron los estadísticos descriptivos básicos necesarios (media, mediana, desviación típica, etc.), descartando por falta de necesidad recurrir al uso de técnicas avanzadas de almacenamiento, análisis multidimensional o minería de datos [5,6]. Finalmente, el cálculo de la recarga de la masa de agua se realizó en base al método propuesto por Mendes [7]. A pesar de ser un dato fundamental para el modelo, el empleo de metodologías comparativas [8] que permitan acotar la incertidumbre se antoja complicado, ya que es preciso el uso de fórmulas empíricas con series climáticas más precisas y largas que permitan ajustar mejor a datos bibliográficos calculados para áreas puntuales próximas [1].

Por su parte, las herramientas numéricas de modelado y simulación hidrogeológica están descritas minuciosamente por numerosos autores como Custodio y Llamas [2], y aplicadas en distintas regiones geográficas [9], respondiendo en cada caso a la información disponible y a la percepción del modelador.

## 4. Marco geológico-estructural

Desde el punto de vista geológico, la masa acuífera objeto de estudio se trata de un páramo calcáreo elevado, limitado a muro por un paquete arcilloso prácticamente impermeable. En la zona de estudio afloran materiales pertenecientes al Neógeno Mioceno y al Cuaternario. El Mioceno ocupa la totalidad de la zona y está parcialmente recubierto por materiales Pliocenos y Cuaternarios aluviales y coluviales de variada naturaleza (Tabla 1).

Tabla 1. Descripción estratigráfica del páramo (subrayada la principal formación acuifera).

Litología	Periodo	Área km <sup>2</sup>	Espesor m
Gravas, arenas, limos (depósitos de aluviales, fondos de valle y terrazas bajas en los ríos principales)	Cuaternario	54	2-5
Gravas, arenas, limos, arcillas (depósitos terrazas medias ya altas)	Pleistoceno-Holoceno	59	5-10
Calizas, margocalizas y brechas calcáreas y oncolíticas. Calizas del páramo 2	Mioceno Superior Tortoniense	0	0-1
Margas, limos, arenas y arcillas ocreas o rojas	Mioceno Superior Tortoniense	1	0-15
<u>Calizas y margas. Calizas del páramo 1 o inferiores</u>	<u>Mioceno Superior Vallesiense</u>	<u>930</u>	<u>2-18</u>
Margas yesíferas (Facies Cuestas)	Mioceno Medio-Superior	113	2-80
Margas, margocalizas y arcillas (Facies Cuestas)	Mioceno Medio-Superior	278	2-6
Limos y arenas ocreas, con niveles conglomeráticos y costras (Facies Tierra de Campos)	Mioceno Medio	80	30-60
Margas, margocalizas y arcillas (Facies Dueñas)	Mioceno Inferior-Medio	20	29-329
Arcosas y limos arcillosos, blancos, grises-verdosos u ocreas, con costras	Mioceno Inferior-Medio	15	29-41

Fuente: Adaptada de [10].

Estratigráficamente los materiales del Mioceno se corresponden a los términos de colmatación de la serie sedimentaria de la cuenca Terciaria del Duero, y está constituida por sedimentos generados en un medio muy salino y de muy baja energía, depositados en el Pontense. En el Páramo de Torozos están representados los tres tramos del Mioceno castellano de la zona central de la cuenca del Duero: Facies Tierra de Campos, Facies de las Cuestas, y Calizas de los Páramos, es decir, el páramo está formado por un nivel inferior constituido por una serie de arcillas y margas yesíferas y calcáreas que configuran las cuestas. El contacto es gradual a techo y aparecen niveles calcáreos intercalados hasta constituir series de calizas continuas, que constituyen el cuerpo principal del acuífero [10].

La Facies Tierra de Campos es una serie formada por arcillas limo-arenosas ocreas, con paleocanales arenosos y conglomeráticos intercalados. Esta serie presenta una cierta permeabilidad en los niveles arenosos y conglomeráticos.

La Facies de las Cuestas está constituida por arcillas, margas yesíferas, intercalaciones de calizas y yesos especulares en algunas zonas. Desde un punto de vista hidrogeológico, y en conjunto, se puede considerar como un paquete impermeable.

Las Calizas del Páramo incluyen tres niveles sedimentarios, dos niveles de caliza separados entre sí por un nivel de

materiales con una mayor componente de terrígenos (margas calcáreas y arenosas). Hidrogeológicamente, la porosidad de esta unidad se desarrolla por procesos de karstificación aprovechando las brechas de las zonas de fractura tectónica o diagenética, los nódulos o los moldes fosilíferos (porosidad móldica), y las aperturas de inserción de raíces. Las micro-cavernas suelen estar rellenas de arcillas rojas residuales (terra rossa) del proceso de disolución kárstica.

Finalmente, los procesos neotectónicos en los estertores del paroxismo alpino a finales del terciario y principios del cuaternario (pliocuaternario) sincrónicos al proceso de sedimentación de la formación del páramo calcáreo, han incidido sobre la geometría de éste, con un basculamiento generalizado hacia el oeste de toda la cuenca sedimentaria terciaria, y un suave cambio lateral de facies representado en un acuñaamiento de la serie calcárea, también hacia el oeste. Resultado de estos procesos neotectónicos se generan dos grandes fracturas que compartimentan el frágil zócalo hercínico de la península Ibérica y que se reflejan en alineamientos en los materiales sedimentarios terciarios más dúctiles, se trata de las fallas de Ventaniella con dirección NW-SE y la falla del Alentejo-Plasencia de dirección SW-NE [11]. Estas alineaciones reproducidas en los materiales del páramo, coincidiendo la intersección de ambas direcciones con puntos de debilidad sobre los que progresa el proceso de karstificación y reflejado en la alineación coincidente de la red de dolinas. En el páramo este basculamiento y acuñaamiento se corrobora por el mayor desarrollo que adquieren los arroyos del borde suroeste, con mayores aportaciones y mayor poder erosivo.

## 5. Discusión y resultados

La caracterización hidrogeológica se ha realizado a través del cálculo de: la piezometría; la porosidad, permeabilidad y transmisividad; el coeficiente  $\alpha$  y la curva de agotamiento; y el balance se ha determinado a partir de la estimación de: la recarga; las aportaciones; y las extracciones.

### 5.1. Cálculo de la piezometría

La determinación de la piezometría se realizó mediante un modelo geoestadístico basado en una interpolación de tipo Kriging esférico. De acuerdo con la orientación preferencial geológica, se construyó un modelo anisótropo con un flujo preferencial, en dirección NE-SO, con un ángulo aproximado de 45°. A partir de los resultados obtenidos se identificaron dos estructuras diferenciadas: una de aproximadamente 18 km, correspondiente con la parte norte; y otra de 43 km que incluye todo el resto del páramo (Fig. 3).

### 5.2. Parámetros hidrogeológicos básicos

La estimación de los parámetros hidrogeológicos parte de los datos bibliográficos de las siguientes variables hidrogeológicas [2]:

- Porosidad efectiva de las calizas: 15%
- Porosidad total de las calizas: 30%
- Coeficiente de almacenamiento: 0,15

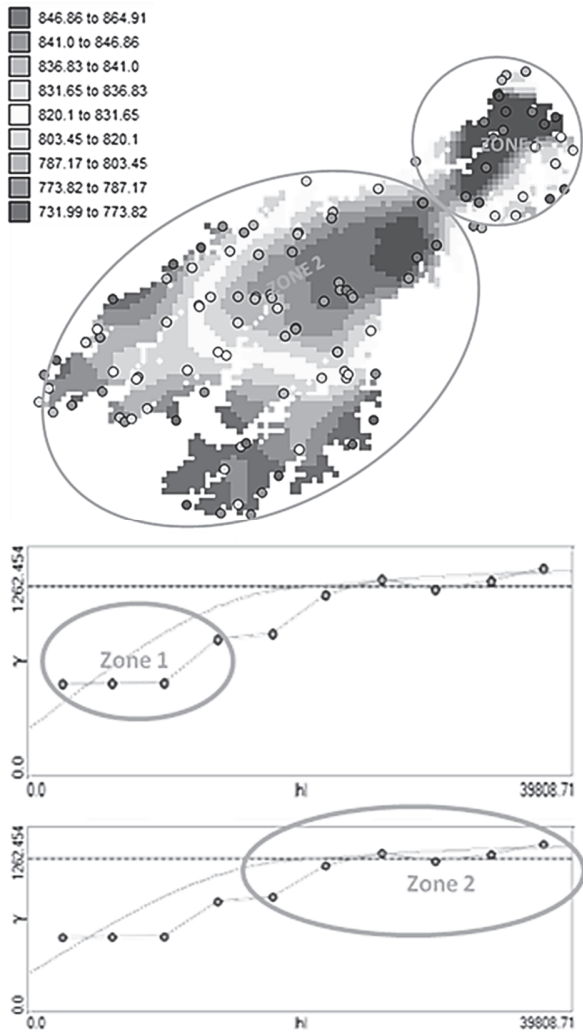


Figura 3. Mapa y variogramas resultantes de la interpolación con SpaceStat. Fuente: [12].

Para determinar la inercia del acuífero se han correlacionado las variaciones de caudal con la precipitación media. De esta forma se ha detectado una correlación  $R^2$  de 0,84 entre la precipitación caída entre los meses de octubre a marzo de 2011 con el caudal medido entre los meses de febrero a julio de 2012, por lo que se puede afirmar que existe una relación directa caudal-precipitación con un desfase (o inercia) de cuatro meses.

A partir del periodo de inercia y el gradiente hidráulico obtenido de la piezometría se puede calcular la permeabilidad [K]. Aceptando una inercia de cuatro meses, y sabiendo que la fuente está situada a 9.500 m, se obtiene una permeabilidad de  $9,16 \times 10^{-3}$  cm/s. De igual manera, suponiendo un espesor medio del acuífero de 12 m, la Transmisividad [T] se ha estimado en  $950 \text{ m}^2/\text{d}$ .

### 5.3 Cálculo del coeficiente $\alpha$

Aplicando la ecuación para acuíferos con forma de cúpula

y drenaje radial, como es este acuífero, el proceso de liberación del agua eq. (1) [2].

$$\alpha = \frac{\pi^2 T}{4SI^2} \quad (1)$$

De esta forma se obtiene un valor de  $\alpha$  igual a:  $4,32 \times 10^{-3}$  (adimensional).

### 5.4. Aproximación a la curva de agotamiento (gasto)

Conocido  $\alpha$ , se ha aplicado el método de los logaritmos de los caudales [7], se crea la recta de agotamiento que responde a la eq. (2):

$$\ln Q_0 = 9,85 - 0,0002 x \quad (2)$$

Deshaciendo el neperiano de los caudales se obtiene:

$$Q_0 = 18958,35 \text{ m}^3 / \text{d}$$

### 5.5. Recarga

Una vez aproximada la curva de gasto a una recta, se puede conocer cómo varía el volumen de agua almacenada ( $V_0$ ) a través de la eq. (3), obtenida a partir del trabajo de Custodio y Llamas [2]:

$$V_0 = \int_0^\infty Q dt = \int_0^\infty Q_0 e^{-\alpha t} dt = \frac{Q_0}{\alpha} \quad (3)$$

Donde:

$Q_0$ : es el caudal al inicio del descenso

$\alpha$ : es el coeficiente de agotamiento, el cual está definido por la pendiente de la recta.

Sustituyendo, se obtiene:

$$V_0 = \frac{18958,35}{0,00017} = 111,52 \text{ hm}^3$$

Considerando un área triangular para la cuenca de 1452 ha, es posible calcular la cantidad de agua infiltrada (I) usando la relación de la eq. (4):

$$I = \frac{V_0}{A} = \frac{111519705,88}{14520451} = 7,68 \text{ mm} \quad (4)$$

### 5.6. Cálculo de aportaciones

*Aportaciones superficiales* (escorrentía). Se ha realizado a partir de los datos de los mapas *raster* de aportaciones anuales y mensuales medios de la Confederación Hidrográfica del Duero [1]. El resultado medio es una aportación media de 8,4 mm/año, que al multiplicarla por la superficie del páramo, se obtiene un volumen de recurso  $8,4 \text{ hm}^3$ .

**Recarga.** Los niveles acuíferos dependerá de los Coeficientes de Infiltración de los diferentes materiales, este modelo solo considera los recursos hídricos útiles almacenados en las calizas. A partir de la infiltración, la lluvia útil y las aportaciones, se obtiene un coeficiente de infiltración de 94,17%.

### 5.7. Cálculo de extracciones

**Drenaje perimetral.** El drenaje perimetral radial se han identificado a partir de la cartografía de 78 puntos de agua. El resultado es un drenaje estimado en 10,22 hm<sup>3</sup>/año.

**Extracciones mediante pozos.** Para los cálculos de las extracciones se ha partido de los datos obtenidos de la IDE del Duero relativos a extracciones subterráneas y unidades de demanda agraria [1]. Se han identificado 211 captaciones con un volumen demanda total anual estimando de 9,02 hm<sup>3</sup>.

### 5.8. Balance hídrico

La forma de calcular las variaciones de volumen del acuífero es restar de las entradas las salidas. De esta forma se obtiene un recurso anual procedente de las precipitaciones estimado en unos 447,95 hm<sup>3</sup>/año; y unas pérdidas de: 306,85 hm<sup>3</sup>/año por evapotranspiración, 9,02 hm<sup>3</sup>/año por las extracciones por bombeo, y un drenaje perimetral de 10,22 hm<sup>3</sup>/año. Esto supone un balance hídrico anual positivo de 113,63 hm<sup>3</sup>/año, de los cuales una parte se perderá por: el efecto goteo desde las calizas hacia el paquete impermeable. Lo que supone un balance positivo de 113,63 hm<sup>3</sup>/año, esta cifra se puede considerar como el modelo más sencillo del acuífero.

### 5.9. Modelo de flujo

El punto de partida del modelo para la simulación es el modelo conceptual (Fig. 4). A partir de él, se define el movimiento del agua dentro del acuífero. Para la modelización geométrica del acuífero se ha partido de la discretización del área, apoyada por un reconocimiento de campo de las litologías permeables y sus contactos impermeables. Se ha definido una malla de 50x50 m sobre la que se han implementado los datos hidrogeológicos y de explotación del acuífero.

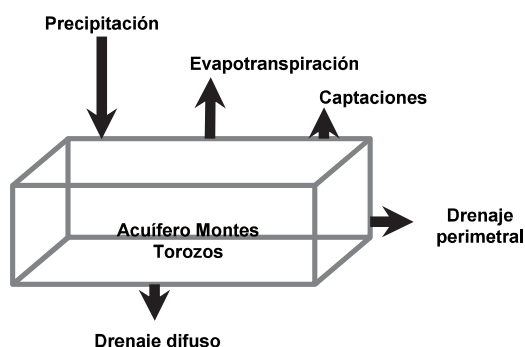


Figura 4. Modelo conceptual. Fuente: [10].

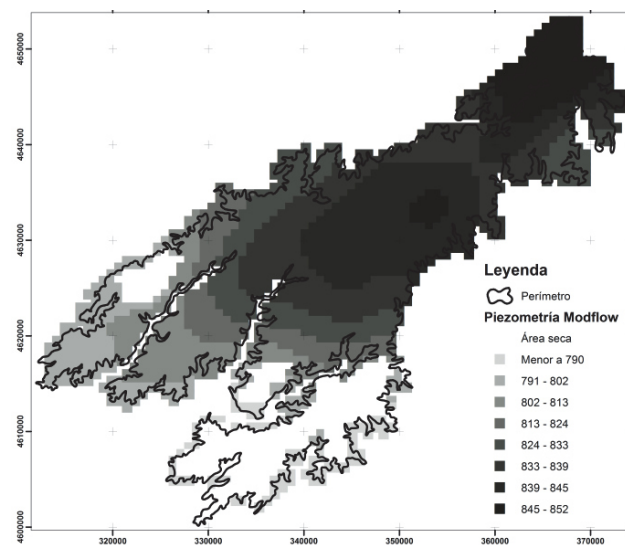


Figura 5. Resultado gráfico del modelo: Piezometría y líneas de flujo. Fuente: [10].

El resultado obtenido, son los valores de la piezometría en todas y cada una de las celdas del modelo (Fig. 5).

El modelo también es capaz de determinar el flujo subterráneo, y por lo tanto es capaz de representar la trayectoria que sufriría una partícula en caso de existir un vertido de una sustancia soluble. Estos resultados espaciales se ven corroborados por los resultados numéricos, ya que el resultado del balance del modelo es de 101 hm<sup>3</sup>, valor muy similar a los 113 hm<sup>3</sup> obtenidos a partir del balance hídrico convencional. De esta forma se obtiene que la medida registrada de los tres piezómetros de control, se encuentra dentro del intervalo de confianza del 95% de los calculados por el modelo.

## 6. Conclusiones

Las calizas del páramo de los Montes Torozos configuran un acuífero libre, colgado topográficamente y aislado; que se recarga directamente por lluvia; y se drena por: a) drenaje perimetral a través de manantiales; b) el efecto goteo difuso a lo largo del contacto entre las calizas del páramo superiores y el nivel impermeable de las arcillas de la Facies Cuestas; y c) a través de explotaciones de pozos. El resultado del balance hídrico del acuífero es positivo con un recurso anual de 100 hm<sup>3</sup>.

A partir de la reconstrucción piezométrica del régimen de extracciones y del aforo de manantiales, se ha modelizado y simulado el comportamiento del flujo del acuífero en régimen estacionario y transitorio. Los resultados obtenidos corroboran diversas hipótesis sobre flujo dominante hacia el SO.

Se ha observado una alta sensibilidad en la variación estacional de los recursos hídricos, ya que responden de forma directa a los cambios. Esta respuesta permite calificar al acuífero de fácilmente recuperable sin necesidad de intervención.

## Agradecimientos

Este trabajo forma parte de la proyecto de investigación desarrollado en la Tesis Doctoral "Modelo y simulación hidrogeológica para la sostenibilidad del acuífero libre de los Montes Torozos" de la Universidad de Vigo.

## Bibliografía

- [1] Confederación Hidrográfica del Duero. Sistema de Información de la Confederación Hidrográfica del Duero. [en línea]. [fecha de consulta abril 28 de 2015]. Disponible en: <http://www.mirame.chduero.es>
- [2] Custodio, E. y Llamas, M.R., Hidrología Subterránea. Editorial Omega. Barcelona. Segunda Edición Corregida. 2001.
- [3] Martínez-Alegria, R., Taboada, J., Sanz, G. and Giraldez, E., Sustainability in the exploitation of an aquifer for agriculture and urban water supply uses. *AgroLife Scientific Journal*, [on line] 3 (2), pp. 9-12, 2014. [date of reference April 28th of 2015]. Available at: [http://agrolifejournal.usamv.ro/pdf/vol3\\_2/art1.pdf](http://agrolifejournal.usamv.ro/pdf/vol3_2/art1.pdf)
- [4] Mejía, O., Betancur, T. y Londoño, L., Aplicación de técnicas geoestadísticas en la hidrogeología del bajo Cauca Antioqueño. *DYNA*, 74 (152), pp. 136-149, 2007.
- [5] Duque-Mendez, N.D., Orozco-Alzate, M. and Velez, J.J., Hydro-meteorological data analysis using OLAP techniques. *DYNA*, 81 (185), pp. 160-167, 2014. DOI: 10.15446/dyna.v81n185.37700
- [6] Keskin, M.E., Taylan, D. and Kucukisile, E.U., Data mining process for modeling hydrological time series. *Hydrology Research*, 44 (1), pp. 78-88, 2013. DOI: 10.2166/nh.2012.003
- [7] Mendes, E., Perímetros de proteção de captações de água subterrânea para consumo humano em zonas de montanha. Caso de estudo da Cidade da Covilhã. Tesis MSc., Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal. 2006.
- [8] Quiroz, O.M., Martínez, D.E. y Massone, H.E., Evaluación comparativa de métodos de cálculo de recarga en ambientes de llanura. La llanura interserrana bonaerense (Argentina), como caso de estudio. *DYNA*, 79 (171), pp. 239-247, 2012.
- [9] Betancur, T. y Palacio, C., La modelación numérica como herramienta para la exploración hidrogeológica y construcción de modelos conceptuales (Caso de aplicación: Bajo Cauca antioqueño). *DYNA*, 76 (160), pp 137-149, 2009.
- [10] Sanz, G. 2014. Modelo y simulación hidrogeológica para la sostenibilidad del acuífero libre de los Montes Torozos. Tesis Doctoral en Tecnología Medioambiental por la Universidad de Vigo, Vigo, España. [En línea]. 235 P. [fecha de consulta Abril 28 de 2015]. Disponible en: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=42524>
- [11] García, F.J., Moreno, F. and Nozal, F., Neotectonics and associate seismicity in Northwestern Duero Basin. Publicación IGN. Serie Monografías [online]. 8, pp 255-267, 1991. [date of reference April 28th of 2015]. Available at: [http://www.researchgate.net/profile/F\\_Gracia/publication/259707336\\_Neotectonics\\_and\\_associated\\_seismicity\\_in\\_Northwestern\\_Duero\\_Basin/links/0f317530dd253b6b0c000000.pdf](http://www.researchgate.net/profile/F_Gracia/publication/259707336_Neotectonics_and_associated_seismicity_in_Northwestern_Duero_Basin/links/0f317530dd253b6b0c000000.pdf)
- [12] Sanz, G., Albuquerque, T., Martínez-Alegria, R., Antunes, M., and Taboada, J., Hydrogeological vulnerability assessment in Urban systems, Spain, accepted for oral presentation, ICESD 2015, February, 2015, Amsterdam, Netherlands, <http://www.icesd.org>

**G. Sanz-Lobón**, es PhD en Tecnología Ambiental por la Escuela de Ingeniería de Minas de la Universidad de Vigo, España en 2014. Es investigador de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Federal de Goiás, Brasil. Vinculado a la evaluación y gestión de riesgos e impactos ambientales usando herramientas SIG y de simulación numérica.

**R.Martínez-Alegria**, es PhD en Geología por la Universidad de Vigo, España en 2005. Es profesor invitado en la Universidad Europea Miguel de Cervantes, Valladolid, España y Técnico Superior en riesgos naturales y antrópicos de Protección Civil de la Delegación del Gobierno en Castilla y León, España, donde desarrolla trabajos de investigación asociado con la gestión y prevención de riesgos.

**J.Taboada**, es PhD en Ingeniería de Minas en 1993 por la Universidad de Oviedo, España y Catedrático de la Universidad de Vigo, España. Su

trayectoria profesional se ha centrado en la investigación sobre la explotación minera y las tecnologías respetables con el medio ambiente y especializado en la evaluación y modelación de riesgos e impactos ambientales. El Dr. Taboada es coordinador de del Programa de Doctorado de la Ingeniería de Minas de la Universidad de Vigo, España. Uno de sus proyectos más recientes es el software SISMIGAL, cuyo objetivo era desarrollar una herramienta para la gestión del riesgo sísmico en Galicia (zona nordeste de España).

**T. Albuquerque**, es PhD en Ingeniería de Minas en 1999 por la Universidad Técnica de Lisboa, Portugal. Es profesora asociada de dedicación exclusiva en el departamento de Ingeniería Civil del Instituto Politécnico de Castelo Branco, Portugal. Trabaja en la evaluación de impactos y vulnerabilidad ambiental, así como el análisis de riesgos usando sistemas de información geográficos y simulaciones numéricas y geostatísticas. La Dra. Albuquerque es miembro de IMGA (International Medical Geology Association); IAMG (International Association of Mathematical Geoscience) e investigadora senior de APCBEES-Asia-Pacific Chemical, Biological & Environmental Engineering.

**M. Antunes**, es PhD en Geoquímica en por la Universidad de Coimbra, Portugal. Es profesora asociada con dedicación exclusiva en el departamento de Recursos Naturales del Instituto Politécnico de Castelo Branco, Portugal. Su trayectoria está ligada con la evaluación de la vulnerabilidad, los impactos y los riesgos ambientales. La Dra. Antunes es miembro de IMGA (International Medical Geology Association); IAMG (International Association of Mathematical Geoscience) e investigadora senior de APCBEES-Asia-Pacific Chemical, Biological & Environmental Engineering.

**I. Montequi**, es Dra. en Ciencias, Sección de Químicas, por la Universidad de Valladolid, España en 1986. Profesora en la Universidad Europea Miguel de Cervantes, España, con la categoría de Profesor Director, Directora de la Escuela Politécnica Superior del 2002 al 2004 y Defensor de la Comunidad Universitaria desde mayo del 2007. La Dra. Montequi fue Investigadora Principal del proyecto AGUEDA, y cuenta con una amplia experiencia en la gestión de proyectos científicos y de investigación sobre química analítica y cinética de las reacciones.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN

FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Medio Ambiente

Oferta de Posgrados

Especialización en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos

Especialización en Gestión Ambiental

Maestría en Ingeniería Recursos Hidráulicos

Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo

Doctorado en Ingeniería - Recursos Hidráulicos

Doctorado Interinstitucional en Ciencias del Mar

Mayor información:

E-mail: [acia\\_med@unal.edu.co](mailto:acia_med@unal.edu.co)

Teléfono: (57-4) 425 5105