

ANÁLISIS Y CARTOGRAFÍA MEDIANTE SIG DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA FORMACIÓN DE DOLINAS EN EL ENTORNO DE ZARAGOZA

María Teresa Lamelas Gracia

Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Facultad de Filosofía y Letras,
Universidad de Zaragoza, C/Pedro Cerbuna, 12, 50009 Zaragoza, Spain
e-mail: tlamelas@unizar.es, tlamelas@terra.es

Resumen: Los procesos de karstificación son especialmente intensos, en el entorno de Zaragoza, donde los depósitos cuaternarios se disponen sobre materiales evaporíticos terciarios dando lugar a un karst cubierto. Desde comienzos del Cuaternario, estos procesos han provocado el desarrollo de dolinas de muy diverso tamaño, generando un gran impacto económico. Para una buena utilización del territorio -y con el fin de reducir los riesgos asociados- es necesario un análisis regional de este fenómeno. Para ello, se ha elaborado un mapa de probabilidad de formación de dolinas mediante regresión logística en entorno SIG. Este artículo cubre la selección de la información, su manejo en el SIG y la utilización de la regresión logística para la definición de un modelo de probabilidad. La geomorfología es el factor más importante en la formación de dolinas, ya que éstas se forman principalmente en zonas endorreicas y en los niveles de terraza más modernos. El segundo factor relevante es la existencia de regadío, seguido de la presencia de un elevado gradiente del nivel freático.

Palabras clave: Dolinas, riesgos geológicos, SIG, regresión logística, Depresión del Ebro.

Abstract: In the surroundings of Zaragoza, karstification processes are especially intense in covered karst areas where fluvial terraces lie directly on Tertiary evaporites. Since the beginning of Quaternary, these processes have lead to the development of collapse and subsidence dolines with a wide range of sizes, which have significant economic impacts. A regional analysis of this phenomenon is needed for a proper spatial management and to reduce economic impact. Therefore, a probability map of dolines was developed using logistic regression and geographic information systems (GIS). This paper covers the selection of

* Recibido: 14-11-07. Aceptado: 14-12-07.

input data, manipulation of data using the GIS technology, and the use of logistic regression to generate a doline probability map. The primary variable in the doline development in this area is geomorphology, represented by the location of endorheic areas and different terrace levels. Secondary variables are the presence of irrigation and high water table gradient.

Keywords: Dolines, geo-hazards, GIS, logistic regression, Ebro basin.

1. Introducción

La disolución del yeso en agua es, aproximadamente, entre 30-70 (Klimchouk *et al.*, 1996) y 100-150 (Martínez *et al.*, 1998) veces más rápida que la de la caliza, por lo que los procesos de karstificación son especialmente intensos en las zonas de karst cubierto en materiales yesíferos de ambientes semiáridos, aunque en ellas el aporte de agua por precipitación sea inferior a 350 mm anuales.

Como afirman Johnson (2005) y Lamont-Blanck *et al.* (2002), es necesario que existan cuatro condicionantes para que los procesos de karstificación en materiales evaporíticos se consideren activos:

1. Existencia de materiales evaporíticos en superficie.
2. Presencia de agua no saturada con respecto a esos minerales.
3. Salida para la evacuación del agua.
4. Energía suficiente para que el agua fluya a través del sistema.

En la zona de estudio, que se localiza en el sector central de la depresión del Ebro, en el entorno de Zaragoza, todos estos condicionantes se cumplen, de manera que la karstificación ha sido activa a lo largo del Cuaternario, produciendo, como consecuencia, la formación de dolinas tanto por procesos de colapso como por subsidencia del terreno.

Existen muchos ejemplos de cartografía de riesgo de subsidencia, especialmente en países desarrollados de Europa y América del Norte. Por ejemplo, en el entorno de Zaragoza, Soriano y Simón (1995) realizaron un análisis espacial y una simulación experimental de este fenómeno, observando que el contenido de sulfatos en el agua subterránea, el tamaño de grano de los materiales de la cubierta detrítica, la topografía del contacto Terciario-Cuaternario, las variaciones anuales del nivel freático y el espesor de la cubierta detrítica eran los factores más importantes en la formación de dolinas. Teniendo en cuenta estos factores, desarrollaron un modelo teórico espacial del riesgo, expresado mediante una ecuación matemática y una cartografía del riesgo de formación de dolinas, a escala 1:50.000, en su zona de estudio, localizada en un sector del valle del Ebro aguas arriba de la ciudad de Zaragoza.

En estudios posteriores, Simón *et al.* (1998b) descubrieron que el modelo no se podía aplicar a una escala de mayor detalle -1:25.000- y realizaron un análisis cualitativo. Tres factores principales fueron introducidos en la cartografía de riesgo de subsidencia. Estos factores, por orden de importancia, son:

1. La topografía del contacto Terciario-Cuaternario.
2. El espesor de los depósitos cuaternarios.
3. El porcentaje de lutitas en los depósitos cuaternarios.

El gradiente en el contenido de sulfatos del agua subterránea fue también incorporado como un factor secundario, dando como resultado una cartografía del riesgo potencial de subsidencia. Posteriormente, esta cartografía fue combinada con un mapa del riesgo actual de subsidencia, elaborada a partir del análisis visual de fotografías aéreas y cartografía de dolinas. El resultado final es una cartografía del riesgo real de subsidencia que presenta siete categorías diferentes.

Kaufmann y Quinif (2002) también efectuaron un análisis cualitativo mediante la aplicación de SIG en el sur de Bélgica. Utilizaron información cartográfica de la hidrogeología y geología de la zona de estudio para elaborar una cartografía de este georriesgo. La disponibilidad de cartografía de localización de las dolinas fue vital debido a que la distribución de las mismas tiende a formar grupos. Las conclusiones del estudio apuntaron a que las zonas con gran presencia de dolinas coinciden con aquellas en las que existen grandes descensos en los niveles piezométricos, de manera que combinaron la cartografía de este fenómeno con la densidad de dolinas para delimitar zonas de bajo, moderado y alto riesgo de aparición de colapsos.

Green *et al.* (2002) realizaron una delimitación de unidades kársticas mediante la superposición de diferentes elementos del karst, utilizando tecnología SIG, con la finalidad de entender mejor la dinámica del paisaje.

En el sureste de Minnesota también existen ejemplos de cartografía de la probabilidad de formación de dolinas. Las primeras cartografías en papel se realizaron mediante la delineación, por los propios autores, de los límites de las categorías de probabilidad, atendiendo a criterios subjetivos. Con posterioridad, en un esfuerzo de incorporar estas cartografías a un entorno SIG, Gao y Alexander (2003) elaboraron un modelo matemático de árbol de decisión para la creación de un mapa de riesgo relativo de formación de dolinas, basado, principalmente, en la distribución de la distancia a la dolina más cercana y en la densidad de las mismas.

Whitman y Gubbels (1999) estudiaron las relaciones entre factores hidrogeológicos y la formación de dolinas en las proximidades de Orlando, Florida. Mediante la utilización de imágenes Landsat TM, información topográfica digital y sondeos modelaron las diferencias existentes entre los niveles piezométricos de una serie de acuíferos subsuperficiales y el acuífero regional confinado de Florida.

Lei *et al.* (2001) estudiaron la relación existente entre la distribución de dolinas y la karstificación de la roca, el tipo y propiedades de los suelos, las características del agua subterránea, las actividades humanas, los usos del suelo, las infraestructuras y el desarrollo económico. Finalmente, desarrollaron un mapa de riesgo de dolinas mediante la aplicación de un método de pesos cualitativos en SIG, en el que introdujeron tres factores: nivel piezométrico, tanto en estación seca como húmeda; espesor del suelo; y, finalmente, la karstificación de la roca combinada con la distancia entre fracturas.

En nuestra zona de estudio, la subsidencia y formación de dolinas ha supuesto un gran coste económico debido a la ruptura de las infraestructuras de regadío y de la red de abastecimiento de agua de muchos núcleos de población, así como la destrucción de infraestructuras de transporte y edificios. Se estima que el coste económico total debido a estos factores ha sido del orden de decenas de millones de dólares (Soriano y Simón, 1995).

La mayoría de los estudios realizados en la zona de estudio, con excepción de los elaborados por Soriano y Simón (1995) y Simón *et al.* (1998a, 1998b), están orientados a resolver problemas puntuales, pero muchos de los expertos están de acuerdo en la necesidad de un análisis regional del fenómeno para la planificación urbana (Benito *et al.*, 2000; Guerrero *et al.*, 2004; Gutiérrez-Elorza y Gutiérrez-Santolalla, 1998; Simón *et al.*, 1998a, 1998b; Simón y Soriano, 2002). Esto se hace especialmente necesario en áreas complejas, como el entorno de la ciudad de Zaragoza, que está caracterizado por un dinámico desarrollo industrial y urbano.

De acuerdo con Paukštys *et al.* (1999), la forma más económica y efectiva de planificación en estas áreas pasa por evitar las dolinas ya existentes y las zonas más propicias para la formación de otras nuevas. La aplicación de esta filosofía preventiva implica el reconocimiento de áreas afectadas por procesos de subsidencia y la elaboración de mapas de peligrosidad (Guerrero *et al.*, 2004).

En las últimas décadas, muchos países han elaborado bases de datos de karst integradas en SIG mediante las cuales ha sido posible realizar interpretaciones acerca de las relaciones existentes entre las diferentes informaciones de partida (Cooper *et al.*, 2001; Gao *et al.*, 2001; Gao *et al.*, 2005; Green *et al.*, 2002; Lei *et al.*, 2001). Sin embargo, no existen muchos ejemplos relativos a la cartografía del riesgo de subsidencia a partir del análisis multivariante integrado en SIG, en comparación con otros riesgos geológicos como, por ejemplo, la producción de deslizamientos del terreno.

Por esta razón, nuestro objetivo principal es la elaboración de un mapa de probabilidad de formación de dolinas mediante la utilización de técnicas de análisis multivariante en SIG para poder diferenciar entre áreas de mayor y menor susceptibilidad. Es nuestro propósito mejorar el conocimiento existente hasta el momento sobre

los factores que determinan en mayor medida la distribución de las dolinas en esta área en constante crecimiento urbano.

Para llevar a cabo este objetivo es necesario cubrir una serie de objetivos secundarios:

- Revisión del estado de la cuestión en la zona de estudio con la finalidad de conocer los factores involucrados en el fenómeno.
- Revisión de metodologías para su aplicación al análisis de la susceptibilidad.
- Cartografía de las dolinas ya formadas en la zona de estudio.
- Análisis y cartografía de las variables geológicas, medioambientales y antrópicas que tienen un papel principal en la aparición del riesgo.
- Análisis multivariante de toda la información recopilada para la elaboración de un mapa de probabilidad de formación de dolinas mediante la utilización de la regresión logística.

2. Descripción de la zona de estudio

2.1. Caracterización general

El área de estudio se encuentra dentro del eje del Corredor del Ebro (Figura 1), un área de un gran dinamismo económico debido, principalmente, a su posición estratégica en medio de cuatro de los más importantes nodos de desarrollo de la Península Ibérica (Madrid, Barcelona, Bilbao y Valencia). Este factor hizo posible un rápido y continuado desarrollo económico y urbano a lo largo de las últimas décadas, desde que en 1964 Zaragoza fuera declarada Polo de Desarrollo Industrial, produciendo así un gran incremento de población, de manera que en los años setenta se alcanzaron los 500.000 habitantes. En la actualidad, la ciudad tiene una población total de, aproximadamente, 700.000 habitantes, la cual supone más del 60% de la total de la Comunidad Autónoma de Aragón; además, se espera que haya un incremento mayor en esta década. En 2008 Zaragoza organizará la Exposición Internacional “Agua y Desarrollo Sostenible”, implicando un incremento en la construcción de nuevas infraestructuras y la creación de puestos de trabajo, que pueden atraer a más población.

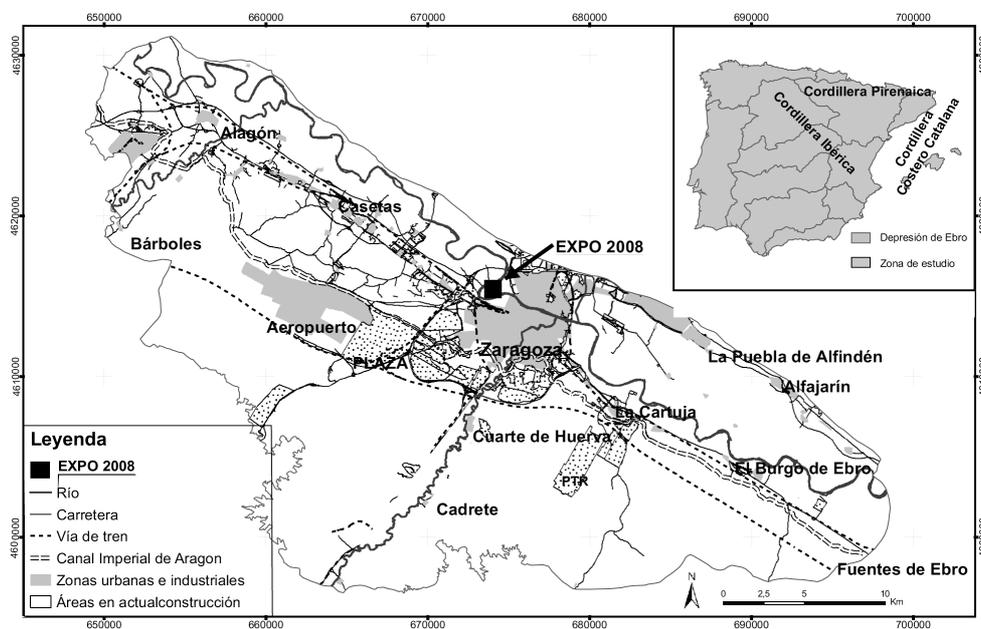


Figura 1. Localización de la zona de estudio.

Desde el punto de vista geológico, la Depresión del Ebro está limitada por los relieves pirenaicos, ibéricos y costero-catalanes, conformando un perímetro triangular (Figura 1). Su formación está determinada por la historia deformacional de los relieves circundantes, surgidos a consecuencia de la orogenia Alpina, a mediados de la Era Terciaria, acontecimientos que conducen a la individualización de aquella como cuenca (Alberto *et al.*, 1984).

Durante la primera fase de sedimentación (Paleoceno-Eoceno) la Cuenca del Ebro estuvo sujeta a varias transgresiones y regresiones del mar, de manera que fueron depositados tanto sedimentos marinos como terrestres. Sin embargo, muchos de estos primeros sedimentos fueron incorporados al cinturón de la orogenia pirenaica (Gutiérrez-Elorza y Gutiérrez-Santolalla, 1998).

Como resultado de la regresión marina del Eoceno superior, la Cuenca del Ebro fue separada del océano y se convirtió en una cuenca endorreica rodeada por cadenas montañosas (Benito *et al.*, 1998). Durante este periodo endorreico el levantamiento tectónico y la erosión de los relieves circundantes llevó a la sedimentación de abanicos aluviales de materiales detríticos compuestos por conglomerados, arenas,

margas y arcillas en los márgenes de la Cuenca. En las partes más distales de estos abanicos, favorecido por un clima semiárido, se formaron calizas y evaporitas continentales en ambiente lacustre (Benito *et al.*, 1998).

Desde el Oligoceno hasta el Mioceno fueron depositados grandes cuerpos evaporíticos sedimentarios, especialmente en áreas con mayor subsidencia. En el sector central de la Depresión, estos depósitos de *playa-lake* corresponden a la Formación Zaragoza, que constituye la masa mayor de yesos del centro de la Depresión del Ebro y que geográficamente queda dividida por los ríos Ebro y Gállego en tres sectores: Retuerta, Mediana y Alfocea (Quirantes, 1978). Probablemente al final del Mioceno el río Ebro comenzó un periodo erosivo que dio lugar también al comienzo de la karstificación de las unidades evaporíticas (Gutiérrez-Elorza y Gutiérrez-Santolalla, 1998).

En el curso del Cuaternario, las terrazas y glaciares se han ido depositando a techo de estas formaciones evaporíticas (Figura 2), conformando un acuífero aluvial que hace de la karstificación un proceso activo y permanente.

El clima tiene actualmente un carácter semiárido, con una precipitación anual de aproximadamente 350 mm y una temperatura anual de unos 15° C. Se trata de un clima Mediterráneo Continental que se caracteriza también por la irregular distribu-

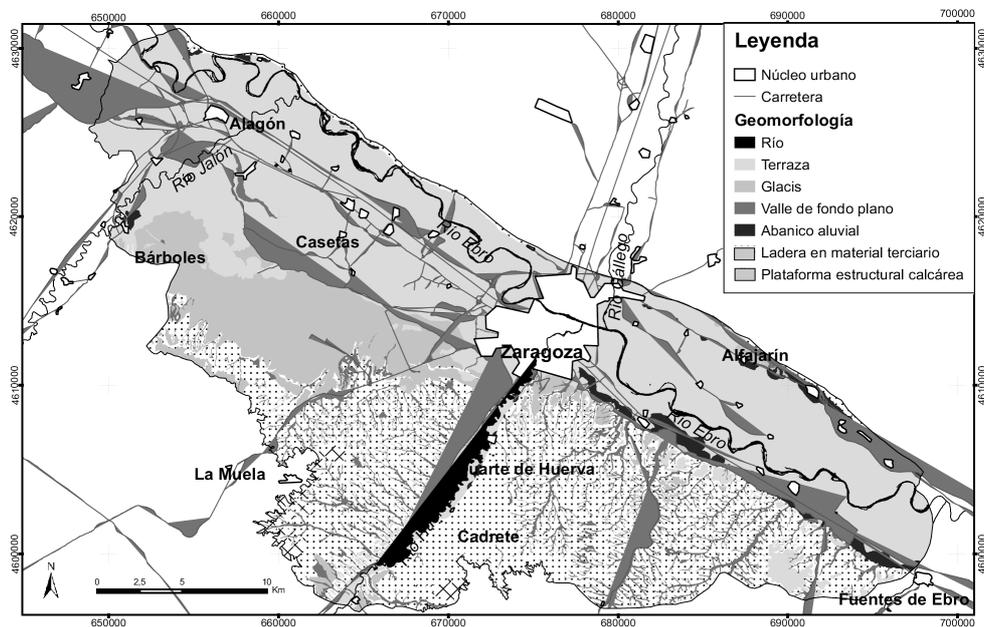


Figura 2. Mapa geomorfológico.

ción de las precipitaciones. Debido a estas condiciones de semiaridez y al fuerte impacto antrópico experimentado en la zona de estudio, la escasa vegetación natural presente se reduce a matorrales esclerófilos en las estepas de yesos y a bosques y sotos de ribera en los márgenes de los ríos.

2.2. Formación de dolinas

2.2.1. Descripción del fenómeno

Las dolinas aluviales se generan cuando los depósitos superficiales -terrazas y glaciares- que se asientan sobre los materiales evaporíticos neógenos se movilizan al caer en los conductos generados por disolución de la roca subyacente, formando depresiones en superficie. Su génesis presenta dos mecanismos (Soriano y Simón, 1995):

1. Movilización y evacuación del material por el agua subterránea, que suelen llevar asociada la creación de cavidades en el subsuelo. Movilización que puede deberse a la disolución de los sedimentos yesíferos terciarios o al arrastre mecánico de los depósitos detríticos cuaternarios.
2. Hundimiento de la cubierta aluvial suprayacente, hecho que, a su vez, puede deberse bien a un colapso brusco o bien a una subsidencia lenta. El primero se manifiesta en superficie por la formación de dolinas con paredes muy escarpadas; la segunda provoca que la cobertera se adapte paulatinamente a la disolución existente en el material karstificable, cuyo resultado morfológico son dolinas con paredes más tendidas.

Las dolinas aluviales, tal y como apuntan Soriano y Simón (2002), presentan una morfología variada, encontrándose los principales tipos descritos en la literatura tradicional sobre este tema (Cvijic, 1981; Palmquist, 1979): cubeta, embudo, ventana y fondo plano con paredes escarpadas.

En la zona de estudio, la forma en planta y dimensiones de las dolinas presentan gran variedad. El diámetro oscila entre unos pocos y un centenar de metros, la profundidad entre 1 y 20 metros. Existen también grandes depresiones de una longitud máxima de hasta 1100 m y una anchura de 600 m, denominadas uvalas. Se observó que las dolinas se localizaban preferentemente en el segundo nivel de terraza, siendo evidente una reducción en su densidad en la llanura aluvial.

Soriano y Simón (2002) monitorizaron la subsidencia que manifestaban diferentes dolinas durante un periodo de cuatro años y obtuvieron valores promedio de subsidencia de entre 21 y 92 mm/año. Gutiérrez-Santolalla *et al.* (2005b) observaron que

en el sector aguas abajo de Zaragoza la mayoría de las dolinas eran depresiones cerradas de menos de 1,5 m de profundidad y de márgenes suavizados; que presentaban geometrías y dimensiones muy variadas, alcanzando hasta los 0,35 km² de superficie y 2 km de longitud. También han sido reconocidas, aunque en una baja proporción, dolinas en la llanura aluvial que presentan bordes escarpados y dimensiones de hasta 7 m de longitud y 2,5 m de profundidad.

2.2.2. Factores condicionantes

Gutiérrez-Elorza y Gutiérrez-Santolalla (1998) elaboraron una clasificación de los factores que controlan el proceso de disolución. Estos autores diferenciaron entre factores geológicos y medioambientales. Por otro lado, Soriano y Simón (1995) diferenciaron entre factores físicos, hidrológicos y humanos. A pesar de las diferencias, en general, todos los expertos están de acuerdo en que los factores que controlan el proceso son:

1. Geológicos:
 - a. Litológicos: características de los depósitos cuaternarios superficiales (textura, porosidad y permeabilidad).
 - b. Estratigráficos: espesor de las formaciones de yesos y de los depósitos cuaternarios, intercalación de materiales no solubles, existencia de cuerpos de halita.
 - c. Estructurales: estructura de las formaciones de yesos, existencia de discontinuidades, diaclasas y fracturas.
 - d. Geomorfológicos: configuración del relieve.
 - e. Hidrogeológicos: velocidad y régimen del flujo, infiltración de agua, gradiente hidráulico, profundidad y variaciones estacionales del nivel freático, espesor saturado en los depósitos cuaternarios, composición química del agua subterránea.
2. Medioambientales:
 - a. Clima: existencia de eventos de tormenta y altas temperaturas.
3. Antrópicos: regadíos, extracción de agua subterránea y construcción de infraestructuras.

Guerrero *et al.* (2004) concluyeron que los estudios recientes basados en sondeos e interpretaciones del paleokarst ponen de manifiesto la importancia de las sales y la karstificación por sulfato de sodio en el proceso de subsidencia. Confirmaron que hay presencia de halita en estratos próximos a la superficie, en algunos sectores del valle del río Huerva (Figura 2), como es el caso del núcleo de Cadrete, y que parece pro-

bable que cuerpos de halita existentes previamente hayan sido eliminados de la secuencia evaporítica aflorante por disolución. La existencia de halita y de sulfato de sodio en la roca es un factor crucial para la producción de fenómenos de subsidencia, inducidos por disolución. Mientras la solubilidad del yeso a 25° C es 2,4 g/l, halita y glauberita presentan solubilidades de 360 y 118 g/l, respectivamente (Ford y Williams, 1989).

Guerrero *et al.* (2004) también observaron que la mayoría de los problemas de subsidencia ocurrían fuera del núcleo urbano de Zaragoza, donde existen espesores de depósitos cuaternarios relativamente pequeños. Atribuyeron este hecho a que la mayoría de la ciudad se asienta sobre depósitos cuaternarios cementados y de gran espesor. Esta afirmación concuerda con los resultados obtenidos por Simón *et al.* (1998b) y Soriano y Simón (1995). Sin embargo, un estudio reciente de Gutiérrez-Santolalla *et al.* (2005b) revela que en la llanura aluvial del Ebro, aguas abajo de Zaragoza, el grosor de los depósitos cuaternarios no tiene una influencia significativa en la formación de dolinas.

En la zona de estudio existen dos direcciones preferenciales en la fracturación: N-S y NO-SE (Arlegui y Simón, 2000). La mayoría de los expertos afirman que el eje NO-SE presenta un gran control morfogenético. Soriano (1992) también comparó la dirección de los ejes de las dolinas con esta dirección de fracturación y observó grandes correlaciones. En la Puebla de Alfindén -10 km al NE de Zaragoza- Maldonado *et al.* (2000) concluyeron que la formación de dolinas, en su mayoría, seguía el eje NO-SE.

Con respecto a factores climáticos, Maldonado *et al.* (2000) monitorizaron la evolución de las dolinas y concluyeron que la formación de las dolinas estaba dirigida por eventos tormentosos. Del mismo modo, Soriano y Simón (2002) afirmaron que los ratios de subsidencia se correlacionaban con la lluvia, pero ellos apuntaban a que los cambios en el ratio de subsidencia eran muy sutiles, de tal manera que la influencia de la lluvia no podía ser muy fuerte.

Siguiendo el modelo presentado por Jiménez-Torrecilla *et al.* (2004), otro factor que podría influir en la formación de dolinas es la localización de áreas donde el acuífero terciario descarga en el acuífero aluvial.

Por último, existe una gran interacción -de carácter recíproco- entre las actividades antrópicas y la formación de las dolinas. Por un lado, muchas infraestructuras han sido afectadas por la subsidencia, por otro lado, ciertas actividades humanas favorecen su formación. Benito y Gutiérrez-Elorza (1988) observaron que las dolinas se formaban preferentemente en las proximidades de canales de agua. Además, Soriano (1992, 1995) y Guerrero *et al.* (2004) observaron que la formación de dolinas era muy habitual a lo largo del Canal Imperial de Aragón. Las variaciones del nivel freático

también pueden considerarse un factor antrópico, pues son provocadas por aportes de agua del regadío (Soriano y Simón, 1995); cuando el nivel disminuye, se incrementa el gradiente y la velocidad del flujo, se facilita la recarga y se reduce la resistencia geomecánica de la cubierta (Gutiérrez-Elorza y Gutiérrez-Santolalla, 1998).

2.2.3. El riesgo geológico

La presencia de las dolinas ha causado muchos problemas tanto en las actividades agrícolas como en las infraestructuras. Los agricultores pierden terreno agrícola cuando una dolina se forma, de manera que intentan reemplazarlo rellenándolas. Aguas arriba de Zaragoza, los problemas con infraestructuras y edificaciones se intensificaron a partir de los años 70, cuando se instalaron un gran número de polígonos industriales. Muchas edificaciones fueron construidas sobre depresiones que habían sido rellenadas años atrás, sin adoptar medidas especiales (Soriano y Simón, 1995). Actualmente, se pueden observar muchos daños en paredes y suelos de algunas fábricas (Figura 3).



Figura 3. Presencia de fracturas en el suelo y las paredes del parking de una fábrica al oeste de la ciudad de Zaragoza. Fotografía realizada por Andreas Deckelman y Christian Tigler. Febrero 2006.

Debido al relleno de depresiones por parte de los agricultores, la superficie de terreno ocupada por dolinas que se puede observar en fotografías aéreas recientes es bastante reducida en comparación con la existente en los años 50. Los agricultores rellenan las dolinas con la intención de poder utilizar el espacio como terreno agrícola; pero muchos propietarios convienen en que ésta es una práctica poco efectiva, ya que estas zonas suelen ser improductivas (Gutiérrez-Santolalla *et al.*, 2005b).

Aguas abajo de Zaragoza, en La Puebla de Alfindén, los daños a los edificios son evidentes, aunque en algunos casos es difícil dilucidar si son debidos a subsidencia por disolución o por hidrocólapsos. Además, algunos tramos de la autopista Madrid-Barcelona atraviesan depresiones cerradas producidas por subsidencia (Gutiérrez-Santolalla *et al.*, 2005b).

También son numerosos los daños en infraestructuras hidráulicas (Figura 4). Concretamente, existe una sección antigua del Canal Imperial de Aragón en el muni-



Figura 4. Ruptura en un pequeño canal en las proximidades de La Cartuja debido a la subsidencia del terreno. Marzo 2006.

cipio de El Burgo de Ebro –afectada por varios colapsos- que tuvo que ser abandonada y reconstruida algunos metros más al norte. Existen también problemas en el barrio de La Cartuja: en el año 2003 se formó una dolina en la piscina municipal, que ya había sido afectada por otra 15 años atrás, pero la piscina había sido reparada sin adoptar medidas especiales.

Son muchos los ejemplos que se pueden recopilar de estudios previos, periódicos y entrevistas con los habitantes de la zona, reafirmando la importancia de este fenómeno y la necesidad de un mayor conocimiento de su distribución espacial para una mejor planificación territorial.

3. Metodología

3.1. Regresión logística

En general, los métodos cualitativos son muy flexibles y permiten una completa utilización del conocimiento experto, pero su mayor inconveniente es que envuelven una gran subjetividad; por ello, los mapas producidos por distintos autores pueden ser muy diferentes. Aunque los procedimientos completamente objetivos no existen, los métodos cuantitativos como la regresión logística aseguran que, asumiendo idénticos criterios, se alcancen los mismos resultados (Beguería y Lorente, 2003).

La regresión logística relaciona una serie de variables predictoras con la ocurrencia o no de dolinas y utiliza esta relación para la creación de un mapa de probabilidad. La ventaja principal de esta técnica, en comparación con la regresión lineal, es la posibilidad de analizar la relación de diversas variables explicativas, tanto cualitativas como cuantitativas, con la variable binomial dependiente. La regresión lineal únicamente se puede aplicar cuando la variable dependiente es cuantitativa y continua. Para analizar una variable cualitativa binaria (0 ó 1) en función de una serie de variables explicativas es necesario aplicar técnicas especiales. Uno de los modelos comúnmente utilizados es el de regresión logística (Bledsoe y Watson, 2001), técnica que ha sido utilizada ampliamente en aplicaciones medioambientales. Battaglin y Goolsby (1997) compararon los resultados de ambas técnicas para identificar las variables hídricas tanto naturales como antrópicas que tuvieran una influencia importante en la concentración de productos químicos provenientes de la agricultura en los ríos; concluyeron que la regresión logística producía mejores resultados en la validación estadística del modelo que la lineal múltiple.

Esta técnica ha sido aplicada con éxito para predecir umbrales en los patrones de inestabilidad de los ríos (Bledsoe y Watson, 2001) y para predecir el riesgo de granizo a corto plazo (Sánchez *et al.*, 1998). Pero, el uso más común de esta técnica, en relación con análisis de riesgos geológicos, es la creación de mapas de probabilidad de deslizamientos (Beguiría y Lorente, 2003; Lee y Min, 2001; Ohlmacher y Davis, 2003).

La regresión logística establece una relación funcional entre la localización del fenómeno codificada de manera binaria (existencia o no de dolinas) y los diferentes factores que juegan un papel importante en la producción del fenómeno. Según este modelo, el logaritmo de la probabilidad (logit) está linealmente relacionado con las variables independientes (Beguiría y Lorente, 2003):

$$\text{Logit}(P) = \ln(P/1-P) = B_0 + B_1X_1 + \dots + B_nX_n \quad (1)$$

donde P es la probabilidad de ocurrencia, X_n es un conjunto de variables independientes y B_n es un conjunto de $n+1$ parámetros. Desarrollando la expresión (1):

$$P = \exp(B_0 + B_1X_1 + \dots + B_nX_n) / 1 + \exp(B_0 + B_1X_1 + \dots + B_nX_n) \quad (2)$$

Los coeficientes de pendiente en la ecuación logística se ajustan a la información categórica mediante el método de máxima probabilidad, que optimiza la probabilidad de que la información observada sea estimada en función de esos coeficientes de pendiente (Battaglin y Goolsby, 1997).

En el análisis de regresión lineal, el coeficiente de determinación (r^2) es utilizado frecuentemente como una medida de ajuste del modelo. En la regresión logística es más común preocuparse de si la predicción es correcta o no que de medir la precisión de los valores predichos con respecto a los observados (0 ó 1); por ello, el coeficiente r^2 tiene aquí escasa importancia (Bledsoe y Watson, 2001).

El test chi-cuadrado (X^2) ayuda en la interpretación de los resultados de la regresión logística:

$$X^2 = -2(\log(L_0) - \log(L_1)) \quad (3)$$

La probabilidad L_0 de que el modelo sea nulo, cuando todos los parámetros son 0, es comparada directamente con la probabilidad L_1 del modelo ajustado. El estadístico X^2 es el específicamente utilizado para realizar esta comparación.

3.2. Cartografía de variables dependientes e independientes

El propósito de este apartado es explicar los pasos llevados a cabo para la cartografía de la variable dependiente (dolina/no dolina), así como de las variables inde-

pendientes que serán introducidas con posterioridad en el modelo de regresión logística. Hay que puntualizar que debido a la carencia de información relativa a algunas variables, como puede ser la localización de estratos de sal, presencia de costras carbonatadas y de fracturas en los materiales terciarios, estas variables no pudieron ser cartografiadas ni introducidas en el modelo, determinando, de esta forma, la precisión de los resultados.

Se crearon, por tanto, Modelos Digitales del Terreno (MDT) de los diferentes factores con información suficiente para poder ser regionalizados. Estos modelos, de resolución espacial de 20 m, se han reducido en su extensión al Acuífero del Ebro, en función de la disponibilidad de información geológica e hidrogeológica.

Para el desarrollo de estos modelos se han utilizado diversas metodologías: la simple georreferenciación y digitalización de mapas anteriormente elaborados o cambio de estructura de los datos (rasterización); en otros casos ha sido necesario analizar fotografías aéreas; y, finalmente, la interpolación de información puntual para la obtención de modelos continuos. Los programas informáticos utilizados para estos propósitos han sido ArcGIS 9.1 (ESRI, 2005) y Gocad (Earth Decision Sciences, 2005). En la Figura 5 se sintetizan los pasos seguidos en la preparación de la información.

Con posterioridad la información cartográfica de cada píxel correspondiente a los MDT de las variables dependiente e independientes se almacenó en una base de datos para ser analizada mediante SPSS 11 (SPSS, 2001). En la base de datos cada fila se identifica con un caso, cada localización en la zona de estudio, y las columnas presentan información de las diferentes variables en dicha localización. Mediante el análisis de regresión logística con SPSS se obtienen los coeficientes de regresión (V. ecuación 1) de las distintas variables, que son introducidos en ArcGIS para la implementación del modelo.

3.2.1. La variable dependiente

Con el fin de modelar la variable dependiente -la localización de las dolinas- se georreferenciaron y digitalizaron las cartografías existentes de estudios de subsidencia realizados con anterioridad en un sector aguas arriba de Zaragoza (Simón *et al.*, 1998a, 1998b). En el resto de sectores de la zona de estudio, al carecer de cartografía previa, se realizó un análisis de las fotografías aéreas de 1984 y 1997. En la Figura 6 se puede observar, por la densidad de dolinas existentes, la magnitud del proceso de generación de dolinas en el sector central del Valle del Ebro. La cartografía vectorial de dolinas tuvo que ser rasterizada y reclasificada en dos valores diferentes: existencia (1) y no existencia (0).

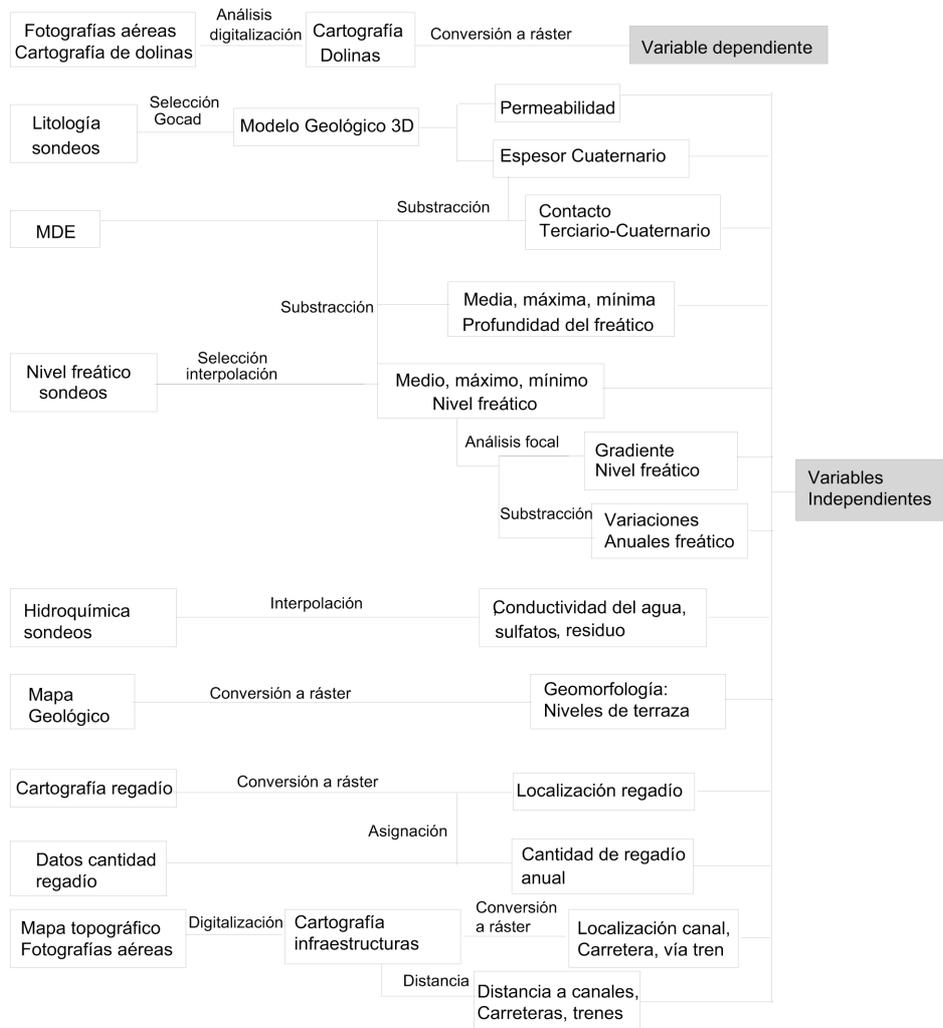


Figura 5. Esquema del proceso de cartografía de las variables a introducir en el modelo.

3.2.2. Las variables independientes geológicas y geomorfológicas

En el caso de variables litológicas y estratigráficas se realizó un modelo tridimensional de los depósitos cuaternarios a partir de información de más de 900 sondeos

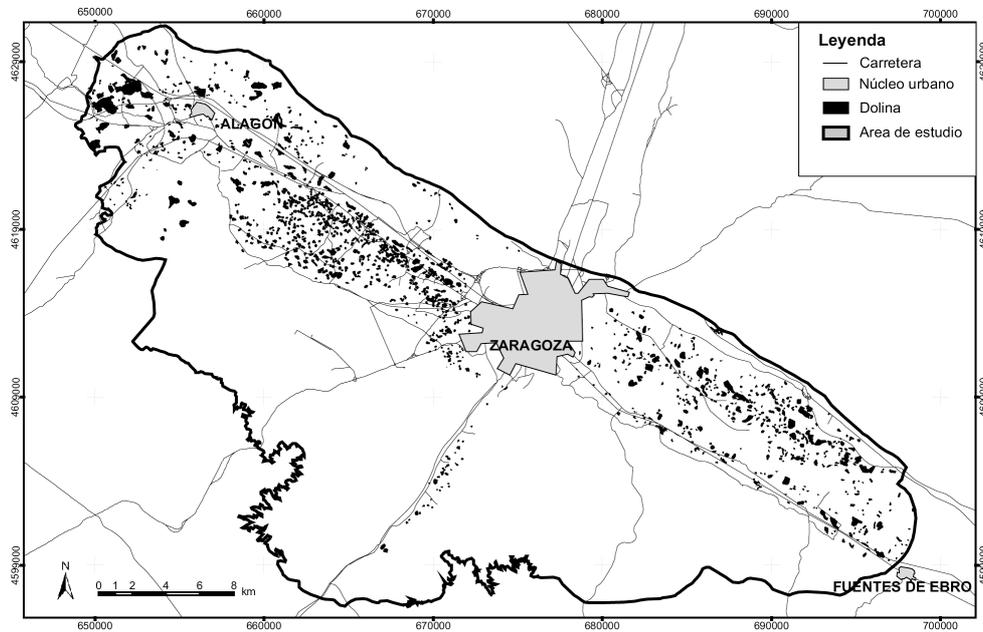


Figura 6. Cartografía de dolinas.

recopilados del *Inventario de Puntos de Agua (IPA)* de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE), de diferentes empresas privadas (Control-7, Entecsa, Z-amaltea, CTA, ESHYG) y de estudios de ingeniería previos a la construcción de carreteras (M.O.P., 1967, 1970, 1973, 1994, 2000, 2003).

Debido a la carencia o imprecisión de la información litológica, algunos sondeos tuvieron que ser desestimados, por lo que finalmente se utilizaron aproximadamente 400 sondeos para la creación del modelo en Gocad (Earth Decision Sciences, 2005). Para establecer el límite inferior del Cuaternario, los estratos en los perfiles de los sondeos se codificaron como Cuaternario o Terciario a partir de la información litológica. En el caso del límite superior del modelo, se utilizó el Modelo Digital del Terreno del Ministerio de Agricultura con resolución espacial de 20 m. La Figura 7 muestra un detalle del modelo tridimensional de los depósitos cuaternarios en la zona de estudio.

La permeabilidad del Cuaternario fue estimada cualitativamente a partir de la información litológica de los sondeos debido a la carencia de análisis y de información precisa acerca de la misma. La metodología se basó en la utilización del tamaño de

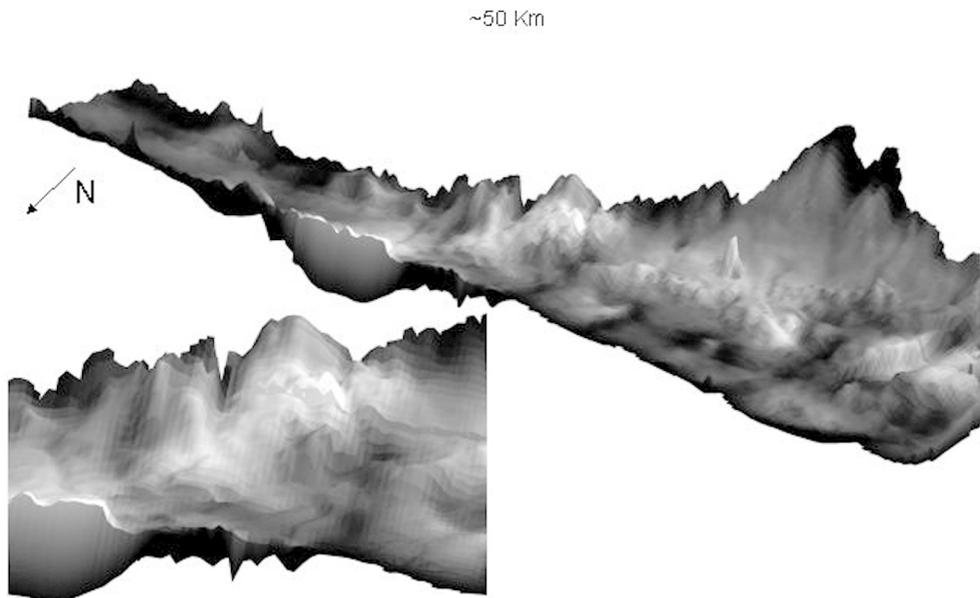


Figura 7. Modelo tridimensional de los depósitos cuaternarios (factor de exageración 50 m).

los granos de los materiales, ya que las arcillas, limos, arenas y gravas presentan sedimentológicamente unos límites superior e inferior bien definidos, de manera que el tamaño de grano medio de las diferentes litologías fue asignado a las mismas. En los casos en que los estratos estuvieran compuestos por varias clases de litologías, el tamaño medio de grano fue determinado en función de su proporción.

El tamaño medio de grano de los diferentes estratos se interpoló con posterioridad dentro del modelo tridimensional de los depósitos cuaternarios creado anteriormente, de tal manera que las zonas que presentaban tamaños de grano dentro del espectro de las arcillas y los limos fueron clasificados como de baja permeabilidad y el resto como permeables. Finalmente, se extrajo el porcentaje de estratos en la columna estratigráfica con permeabilidad baja para la elaboración de un mapa bidimensional (Figura 8). Debido a la carencia de información, el modelo de permeabilidad presentaba valores inusualmente bajos en el porcentaje de estratos impermeables en la zona de los glaciares. Este hecho implicaría una gran permeabilidad de estos depósitos y contradice el conocimiento existente hasta el momento en la zona de estudio, ya que los glaciares se componen de cantos en una matriz arcillo-limosa de baja permeabilidad. Por esta razón, el modelo se mejoró mediante la asignación de los valores encontrados en los sondeos a toda la zona ocupada por los glaciares (porcentaje de estratos impermeables superior al 50%).

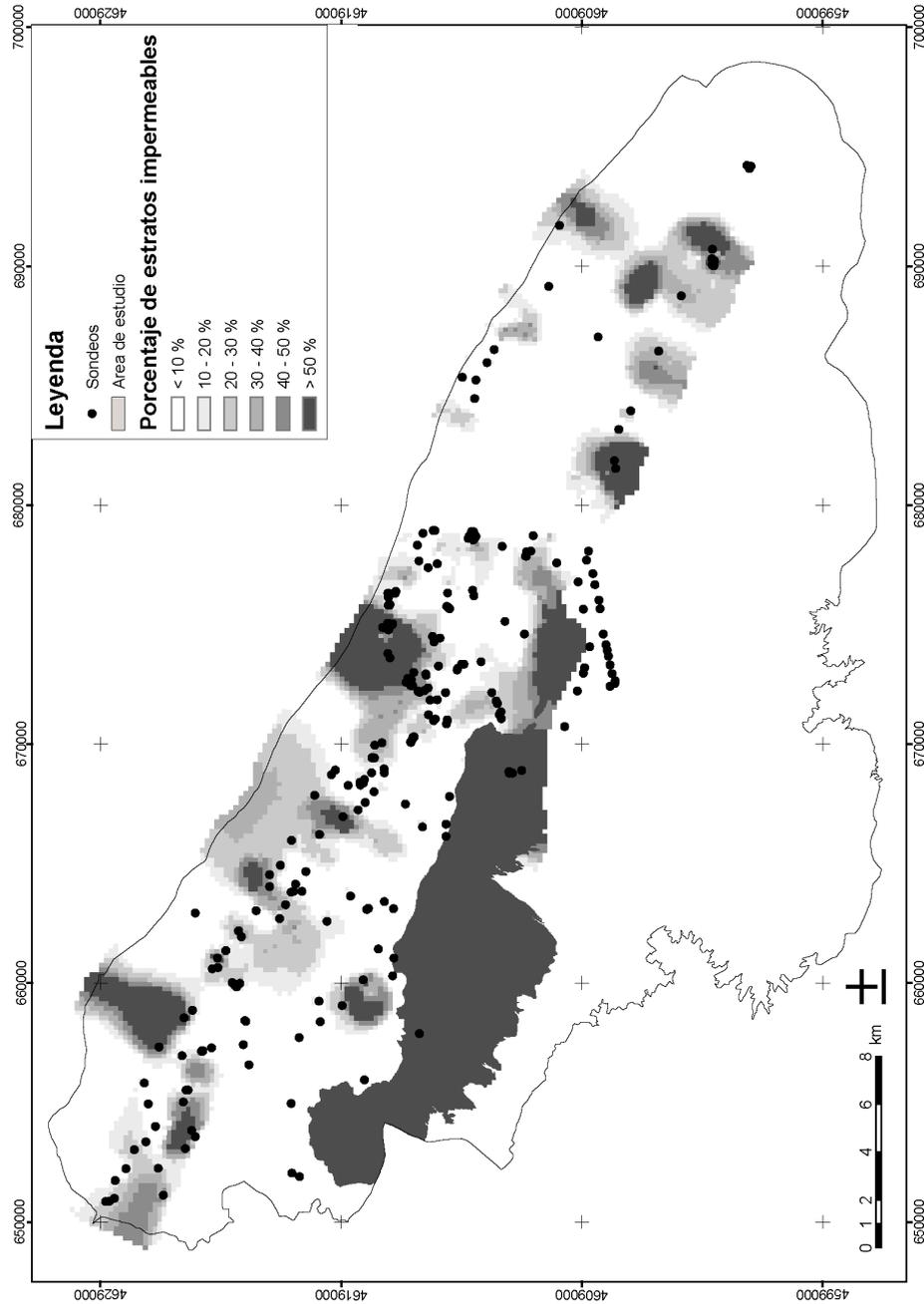


Figura 8. Localización de los sondeos y cartografía de la permeabilidad de los depósitos cuaternarios.

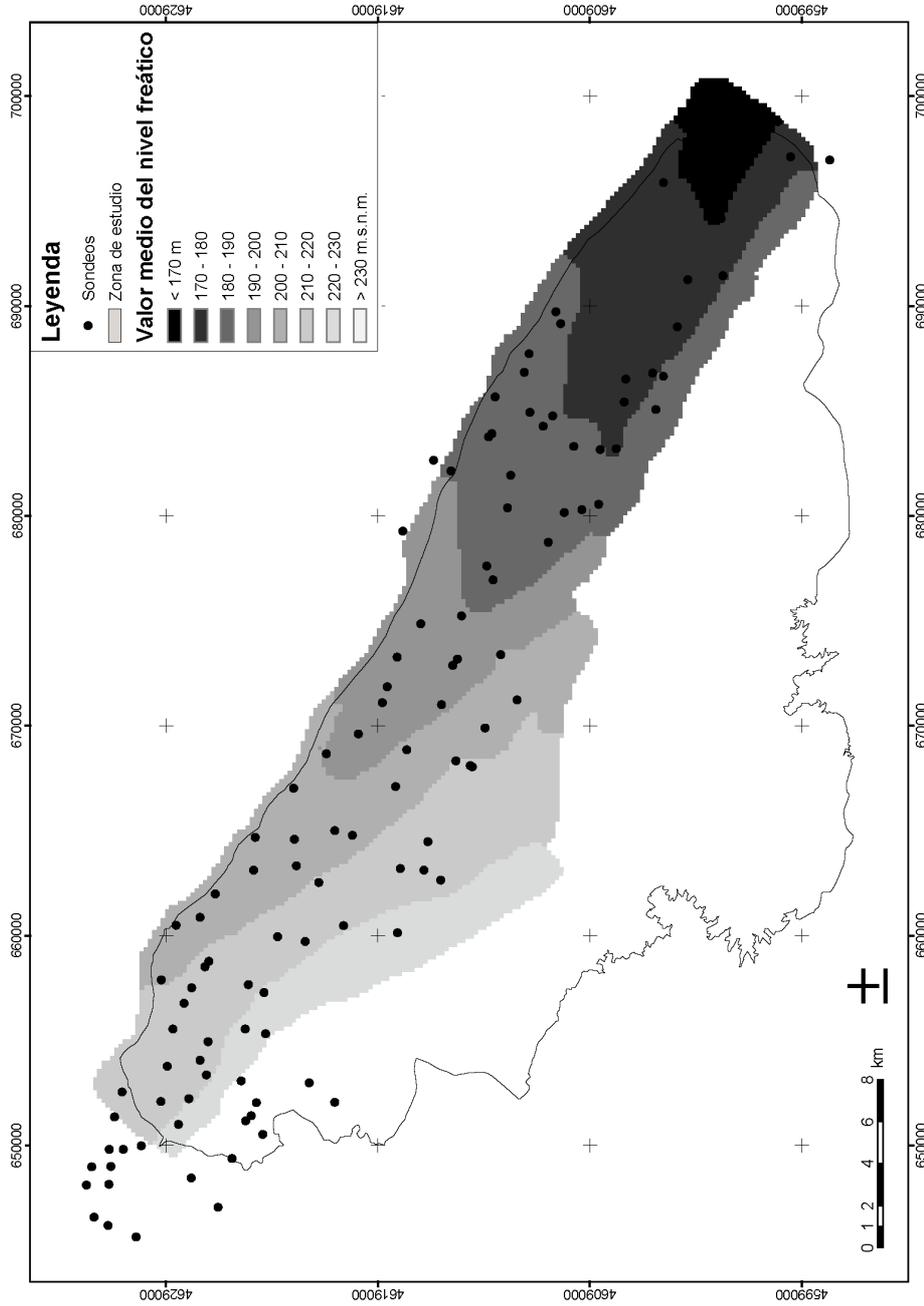


Figura 9. Localización de sondeos con información del nivel freático y cartografía del nivel medio.

Con respecto a la geomorfología, para la localización de los diferentes niveles de terraza se utilizó la cartografía geológica a escala 1:50.000 del Instituto Geológico y Minero de España (ITGE, 1995; 1998) con objeto de valorar si realmente la formación de dolinas se concentraba en un determinado nivel de terraza. La del ITGE estaba en formato vectorial “coverage” y tuvo que ser rasterizada.

Con respecto a las variables hidrogeológicas, la información acerca del nivel freático y la hidroquímica del agua subterránea se obtuvo del IPA, que recopila información hidrogeológica de diferentes estudios, por lo que no es homogénea ni desde el punto de vista espacial ni desde el temporal. Por esta razón, en el caso de los modelos del nivel freático, al no poder disponer de una serie suficientemente amplia que fuese homogénea desde el punto de vista temporal, sólo se utilizaron los sondeos con más de 10 mediciones del nivel freático para reducir posibles errores. La distribución de los puntos de sondeo en la zona de estudio se refleja en la Figura 9. Los valores medio, máximo y mínimo del nivel freático de cada sondeo fueron interpolados utilizando un *kriging* ordinario. Para la cartografía de la profundidad del nivel freático se utilizó el MDE del Ministerio de Agricultura, del que se sustrajo el nivel freático. Con el objetivo de conocer las máximas variaciones interanuales del nivel freático, variaciones entre el verano y el invierno, se realizó una sustracción entre el modelo del nivel freático máximo y el mínimo. En el caso del gradiente en los niveles freáticos se utilizó un filtro de análisis focal. Se utilizó la desviación estándar de un “kernel” de 100 metros de lado para diferenciar las áreas de mayor variación espacial de los niveles freáticos, que implican una mayor velocidad del flujo de agua.

Con respecto a la hidroquímica, la carencia de sondeos con varias mediciones determinó la utilización de todos los sondeos, pero, para evitar la existencia de información errónea, se calculó el error de balance de acuerdo con la metodología de Custodio y Llamas (1983), eliminándose todos los puntos con un error inadmisibles. Para la interpolación de los valores, se utilizó un *kriging* simple y se realizó una validación cruzada debido a la escasez de datos.

3.2.3. Variables medioambientales

El principal factor medioambiental en la formación de dolinas es la producción de fenómenos de tormenta. Sin embargo, este factor no fue incluido en el análisis de regresión ya que, aunque es un fenómeno local, el número de tormentas anuales es relativamente uniforme en la zona de estudio.

3.2.4. Variables antrópicas

Para la localización de zonas de regadío se utilizó la cartografía realizada en el año 2000 por la CHE, disponible en Internet (CHE, 2005), ya que la extensión del rega-

dío no ha variado desde entonces. También se realizó una aproximación a la cantidad de agua de regadío de cada zona, utilizándose la base de datos de dotaciones de agua para cada comarca agraria, igualmente disponible en la CHE; para más información sobre el cálculo de estas dotaciones se puede consultar Cruz *et al.* (1997). Se trata simplemente de una aproximación, ya que las dotaciones representan en máximo de agua disponible en condiciones regulares asignadas a cada comarca agraria, pero no tienen en cuenta los periodos secos en los que la escasez reduce la cantidad de agua realmente utilizada. Por esta razón, en el caso de la selección de esta variable por el modelo, la probabilidad estaría exagerada en periodos secos cuando la cantidad de regadío es menor que la introducida en el modelo.

La impermeabilidad de algunas infraestructuras (carreteras, vías de tren) provoca la concentración de agua en sus bordes, que también se considera un factor importante en la formación de dolinas. Además, la ruptura en la red de regadío representa un gran aporte de agua, que incrementa la probabilidad de formación de dolinas, tal y como apuntaban estudios anteriores en los que se afirmaba que las dolinas se localizan próximas a los canales. Por esta razón, la información de infraestructuras del mapa topográfico en soporte digital, 1:25.000, del Instituto Geográfico Nacional (IGN, BCN25) fue actualizada previa a su utilización, ya que existían nuevas infraestructuras no incluidas. Posteriormente, se crearon modelos de distancia en línea recta a estas infraestructuras para valorar si la formación de dolinas se incrementa proporcionalmente a la distancia a las mismas.

3.3. Selección del modelo

El primer paso fue la visualización de los modelos para tener un mayor conocimiento de los diferentes factores que tienen un papel importante en la formación de las dolinas y analizar sus posibles coincidencias con la distribución de las mismas. Además, se realizó un primer análisis de la correlación de las variables continuas con la densidad de dolinas. En la Tabla 1 se pueden observar los valores de las correlaciones ($\alpha < 0,01$). Las mayores correlaciones las presentan los factores hidrogeológicos, como el gradiente en el nivel freático y las variaciones interanuales del nivel freático, y la elevación del contacto Terciario-Cuaternario. También se abordó un análisis de regresión lineal múltiple entre la densidad de dolinas y las variables con mayor correlación, pero los resultados no fueron satisfactorios, ya que presentaba un R^2 de 0,396. Por esta razón, se decidió definitivamente la utilización de la regresión logística para la elaboración del modelo.

Algunas variables fueron clasificadas en diferentes categorías, teniendo en cuenta el análisis visual y estudios previos de la zona. De esta forma, tanto las variables categóricas como las continuas se introdujeron en el análisis (Tabla 2). El 60% de la información, seleccionada de manera aleatoria, se sometió a un análisis de regresión logís-

Tabla 1. Correlación de Pearson entre las variables continuas y la densidad de dolinas.

<i>Factores</i>	<i>Nombre</i>	<i>Correlación de Pearson</i>
Litológicos		
Porcentaje de estratos impermeables en el Cuaternario	PERMEABI	-0,087
Estratigráficos		
Espesor del Cuaternario	Q_DEP	-0,031
Elevación del contacto Terciario-Cuaternario	COTA_Q	0,317
Hidrogeológicos		
Profundidad media del nivel freático	WT_MEAN	-0,168
Profundidad mínima del nivel freático	HIGWTDEP	-0,185
Profundidad máxima del nivel freático	LOWTDEP	-0,085
Elevación media del nivel freático	WT_MEAN	0,410
Elevación mínima del nivel freático	WT_LOW	0,390
Elevación máxima del nivel freático	WT_HIGH	0,410
Gradiente del nivel freático	GRAWTMEA	0,488
Variaciones anuales del nivel freático	WT_VARIA	0,488
Conductividad del agua subterránea	CONDU	-0,308
Contenido de sulfatos del agua subterránea	SULPHATE	-0,241
Contenido de residuo del agua subterránea	RESID	-0,248
Antrópicas		
Distancia a canales	DIS_CAN	-0,164
Distancia a carreteras	DIS_ROAD	-0,126
Distancia a trenes	DIS_TRAIN	-0,164

tica por pasos sucesivos hacia delante, en el que las variables son introducidas en el modelo en función del grado de significación del estadístico “*score*” ($\alpha < 0,01$) y retiradas basándose en la probabilidad del estadístico “*likelihood-ratio*”, que se basa en la estimación de parámetros condicionales. Aunque la muestra es muy amplia, se realizó un muestreo aleatorio del 60% de información, en lugar de realizar un muestreo estratificado por la variable dependiente, ya que nuestro objetivo no era realizar un modelo predictivo aplicable en otras zonas, sino especializar el fenómeno y relacionarlo con los factores favorables en la zona de estudio.

El modelo se ajusto utilizando el test *chi-cuadrado* que es una valoración de la mejora en el ajuste entre los valores predichos y los observados al introducir los diferentes predictores. Para evitar los posibles errores derivados de la amplitud de la muestra se realizó también una matriz de confusión entre los valores observados (0 y 1) y las clases de probabilidad ajustadas y clasificadas en dos rangos (determinando un punto medio a partir del porcentaje de valores 1 en la muestra) para obtener el total de clasificaciones correctas y seleccionar el modelo final.

Tabla 2. Variables introducidas en la regresión logística.

<i>Factores</i>	<i>Nombre</i>	<i>Tipo</i>
Litológicos		
% estratos impermeables en el Cuaternario	PERMEABI	Continuo
% estratos impermeables en el Cuaternario 0-10 %	PERME_10(1)	Categorico
% estratos impermeables en el Cuaternario >10 %	PERME_100(1)	Categorico
Estratigráficos		
Espesor del Cuaternario 0-15 m	DEPQ_15(1)	Categorico
Espesor del Cuaternario 15-30 m	DEPQ_30(1)	Categorico
Espesor del Cuaternario >30 m	DEPQ_80(1)	Categorico
Espesor del Cuaternario	Q_DEP	Continuo
Elevación del contacto Terciario-Cuaternario	COTA_Q	Continuo
Geomorfológicos		
Geomorfología. Nivel de Terraza T4	T4(1)	Categorico
Geomorfología. Nivel de Terraza T3	T3(1)	Categorico
Geomorfología. Nivel de Terraza T2	T2(1)	Categorico
Geomorfología. Nivel de Terraza T1	T1(1)	Categorico
Geomorfología. Zona endorreica	GEOENDOR(1)	Categorico
Hidrogeológicos		
Profundidad media del nivel freático	WT_MEAN	Continuo
Profundidad mínima del nivel freático	HIGWTDEP	Continuo
Profundidad máxima del nivel freático	LOWTDEP	Continuo
Elevación media del nivel freático	WT_MEAN	Continuo
Elevación mínima del nivel freático	WT_LOW	Continuo
Elevación máxima del nivel freático	WT_HIGH	Continuo
Gradiente del nivel freático	GRAWTMEA	Continuo
Variaciones anuales del nivel freático	WT_VARIA	Continuo
Conductividad del agua subterránea	CONDU	Continuo
Contenido de sulfatos del agua subterránea	SULPHATE	Continuo
Contenido de residuo del agua subterránea	RESID	Continuo
Antrópicas		
Localización del regadío	IRRIG_CL(1)	Categorico
Distancia a canales	DIS_CAN	Continuo
Distancia a carreteras	DIS_ROAD	Continuo
Distancia a trenes	DIS_TRAIN	Continuo
Localización de canales	CANAL(1)	Categorico
Localización de trenes	TRAIN(1)	Categorico
Localización de carreteras	ROAD(1)	Categorico

Tabla 3. Variables seleccionadas por el modelo.

<i>Factores</i>	β	<i>Wald</i>	<i>Exp(B)</i>
HIGWTDEP	-0,09	1682,69	0,92
SULPHATE	-0,02	204,05	0,98
T4(1)	2,35	1714,70	10,50
T3(1)	2,04	1425,65	7,68
T2(1)	1,71	1342,72	5,53
T1(1)	0,57	151,92	1,77
GEOENDOR(1)	2,33	1372,01	10,26
DEPQ_80(1)	-0,64	309,93	0,53
IRRIG_CL(1)	0,48	269,61	1,61
PERME_10(1)	0,14	66,31	1,15
GRAWTMEA	0,33	167,38	1,39
Constante	-4,08	5579,57	0,02

Finalmente, se introdujeron 11 variables en el modelo, de las cuales 8 son categóricas y tres continuas. En la Tabla 3 se muestran las variables y los coeficientes de la ecuación logística (β). El test de Wald es el utilizado normalmente para valorar la hipótesis de que las variables son útiles para predecir los resultados y, por tanto, medir la significación de las mismas. En este caso, todas las variables son significativas ($\alpha < 0,05$), ya que se ha utilizado un procedimiento de pasos sucesivos. Por último, $Exp(\beta)$ expresa el cambio en las probabilidades al incrementar en una unidad la variable independiente. Este estadístico mide la importancia relativa de cada variable en el resultado final.

La bondad de ajuste del modelo se determinó con el 40% restante de la muestra, que no se introdujo en el proceso de regresión, mediante la comparación de los resultados (valores de probabilidad) con la realidad (existencia o no de dolinas). Finalmente, un total de 24.059 casos fueron seleccionados, de manera aleatoria, para el establecimiento de una matriz de confusión (Tabla 4), que produjo un ajuste superior al 68% y un *Índice Kappa* de 0,36, que significa que se ha alcanzado un incremento en un 36% del ajuste aleatorio. La matriz de confusión se utiliza comúnmente en procesos de clasificación para valorar los resultados de los modelos (Beguería y Lorente, 2003; Martínez-Casanovas *et al.*, 2004).

4. Resultados

La variable más significativa, según el modelo, es la geomorfología, que está representada -por orden de importancia- por la localización de las zonas endorreicas y los

Tabla 4. Matriz de confusión.

		<i>Predichas</i>			<i>Bondad de ajuste</i>
		<i>0</i>	<i>1</i>	<i>Total</i>	
Obscervadas	0	8823	3177	12000	73,5%
	1	4477	7582	12059	62,9%
	Total	13300	10759	24059	68,2%

niveles de terraza T4, T3, T2, y T1. Los siguientes factores en importancia son la presencia de regadío y el gradiente en el nivel freático; sigue la localización de zonas con bajo porcentaje de estratos impermeables en depósitos cuaternarios. Este último factor sólo es introducido en el modelo cuando es clasificado en dos categorías, de tal manera que las zonas que presentan <10% (impermeables) incrementan la probabilidad en la formación de dolinas, de acuerdo con el valor positivo de su coeficiente.

En este caso, los factores que presentan valores negativos y por tanto de carácter inverso, son los de menor importancia, tal y como se deduce de su bajo $Exp(\beta)$. Los resultados sugieren que en las áreas con mayores contenidos de sulfatos presentan menores probabilidades de formación de dolinas. Además, en áreas con menor profundidad del nivel freático en verano, que implica que existe un mayor aporte de agua por regadío, se incrementa la probabilidad. Finalmente, la probabilidad es menor donde el espesor de los depósitos cuaternarios es >30 m.

Las variables elegidas por el modelo representan la distribución del fenómeno en la zona de estudio, pero esto no implica que sean las únicas que explican la formación de dolinas. Un ejemplo son las variaciones del nivel freático, que tienen una gran importancia pero no se han introducido en el modelo debido a la gran correlación que presentan con el gradiente del nivel freático.

Los modelos de regresión se utilizan frecuentemente para clasificar el territorio. Esto implica la selección de ciertos valores, a partir de los resultados obtenidos, para clasificarlos en grupos. El método más comúnmente utilizado es la división del histograma de los valores de probabilidad en diferentes categorías con apoyo en opiniones expertas (Lee y Min, 2001; Dai y Lee, 2002; Ohlmacher y Davis, 2003). En el caso de la división en dos clases, el umbral es normalmente la probabilidad 0,5, ya que la muestra suele presentar dos grupos similares en tamaño. Si los dos grupos de la muestra son distintos, la proporción de unos (dolinas) en la muestra (0,06 en nuestro caso) puede ser utilizado en lugar del valor 0,5 (Beguiría y Lorente, 2003; Martínez-Casanovas *et al.*, 2004).

De acuerdo con Ayalew y Yamagishi (2005), esta metodología para la transformación de información continua en 2 ó más categorías no tiene en cuenta la posición

relativa de cada caso en el mapa de probabilidad y es completamente automática, pero no está valorada estadísticamente. Ellos sugirieron un sistema de clasificación que utiliza cuantiles, rupturas naturales, intervalos iguales o la desviación estándar

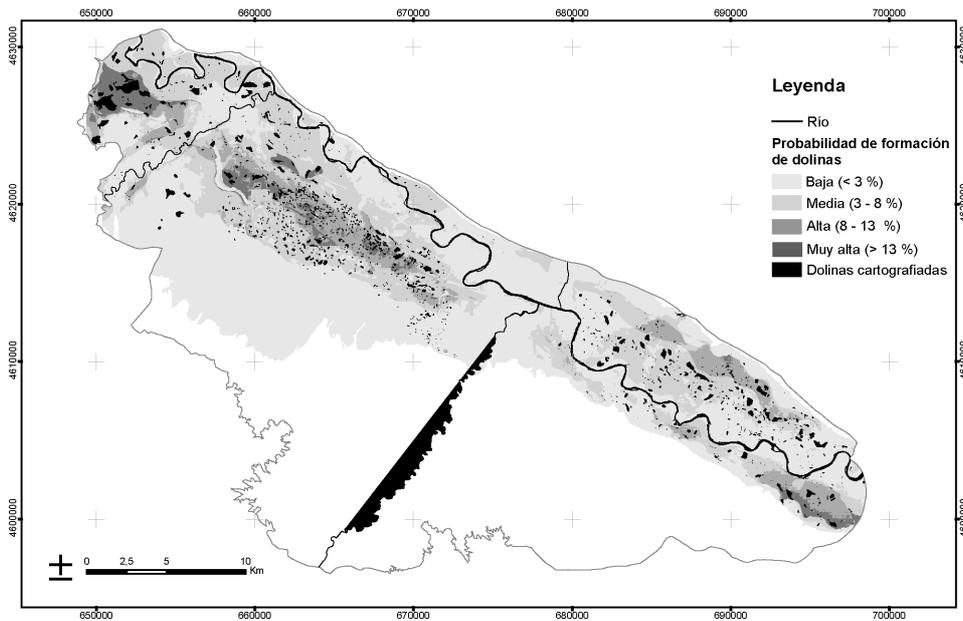


Figura 10. Mapa de probabilidad de dolinas elaborado mediante regresión logística.

La Figura 10 muestra el mapa de probabilidad y, sobreimpuesta, la localización de las dolinas, ya que éstas tienen que ser consideradas como áreas de gran probabilidad en la formación de dolinas. En este caso, el mapa se ha clasificado en cuatro categorías basadas en la media y la desviación estándar. Es necesario puntualizar que la división en categorías se ha hecho con el propósito de una mejor visualización de los resultados, pero no implica una categorización en áreas seguras o inseguras. De hecho, toda la zona presenta una cierta probabilidad de formación de dolinas.

Las áreas más susceptibles a la formación de dolinas se localizan sobre la terraza T2 en toda la zona de estudio, así como en el contacto entre la Terraza T2 y T4 en el sector aguas arriba de Zaragoza, con la excepción de las zonas en las que el espesor del Cuaternario presenta valores >30 m. Esta situación se produce al NE y al S de la ciudad de Zaragoza, donde tradicionalmente se ha asumido la existencia de grandes espesores de Cuaternario. También, es el caso de la desembocadura del río Jalón,

que presenta bajos valores de susceptibilidad, aun encontrándose en la terraza T2, debido a los elevados espesores de terraza.

Los valores más bajos de susceptibilidad se encuentran en zonas con gran porcentaje de estratos impermeables en los depósitos cuaternarios. Éste es el caso de la terraza T1 aguas arriba de Zaragoza, los alrededores del núcleo de Alagón y el sur de Zaragoza. Bajos valores de susceptibilidad presentan también las zonas carentes de regadío, con la excepción de la carretera de Logroño (aguas arriba de Zaragoza), que presenta altos valores en áreas sin regadío; una posible causa es la transformación que ha sufrido esta zona desde los años 60 ligada al proceso de industrialización, ya que anteriormente se trataba de una zona agrícola puesta en regadío que presentaba numerosos humedales.

5. Discusión y conclusiones

La regresión logística permite la introducción de variables categóricas en el análisis. Este hecho es muy importante ya que muchas de las variables más importantes en la distribución de las dolinas son categóricas, como es el caso de la geomorfología, que está representada principalmente por los diferentes niveles de terraza, y la localización de regadío. A esto hay que añadir que, en algunos casos, es necesario categorizar variables continuas para que sean significativas, ya que los cambios producidos de una unidad a otra pueden no ser significativos o no ser constantes a lo largo de un rango de valores de la variable. Esto implica que la relación entre la variable dependiente y la independiente no sigue una lineal recta; tal es el caso del espesor de los depósitos cuaternarios y el porcentaje de estratos permeables en el perfil. Nuestros resultados sugieren que existe un umbral de 30 m de espesor a partir del cual se reduce la formación de dolinas, mientras que en el rango entre 0 y 30 metros las dolinas se forman independientemente del espesor del Cuaternario. Resultados similares se pueden encontrar en estudios anteriores (Johnson, 2005; Simón *et al.*, 1998b; Soriano y Simón, 1995).

Varios autores han demostrado en diferentes zonas de karst cubierto que la formación de una dolina ("madre") favorece el desarrollo de unas condiciones subsuperficiales que, a su vez, favorecen la formación de nuevas dolinas ("hijas") en zonas adyacentes (Cooper y Saunders, 1999; Drake y Ford, 1972; Gutiérrez-Santolalla *et al.*, 2005a; Kaufmann y Quinif, 2002; Palmquist, 1979). En la zona de estudio, aguas abajo de Zaragoza, Gutiérrez-Santolalla *et al.* (2005a) observaron que las dolinas presentaban una clara tendencia a agruparse; calcularon en un campo de dolinas en La Puebla de Alfindén el índice de distribución espacial mediante la metodología de Clark y

Evans (1954), que cuantifica la tendencia de agrupación o dispersión de los elementos en un área concreta, obteniendo un índice próximo al valor 0 ($R= 0,00089$), que indica una distribución en grupos. Gao *et al.* (2005), después de aplicar el Índice de Clark y Evans en una zona de karst activo en Minnesota, también concluyeron que las dolinas tienden a formar grupos; sin embargo, ellos observaron que la tendencia cambiaba hacia aleatoria y regular conforme la escala de análisis disminuía.

Teniendo en cuenta lo mencionado con anterioridad, convenimos con Gutiérrez-Santolalla *et al.* (2005b) que la cartografía de las zonas afectadas por la formación de dolinas es una forma efectiva de planeamiento para evitar los problemas derivados de su formación, ya que estas zonas tienen alta probabilidad de formación de nuevas dolinas. Sin embargo, tal y como ellos apuntaban, estos mapas tienen algunas limitaciones relacionadas con la dificultad de cartografiar todas las dolinas, ya que están enmascaradas por la actividad morfosedimentaria del sistema fluvial (en el caso de niveles de terraza más recientes) y por los rellenos de origen antrópico. Por esta razón, consideramos que el estudio de las relaciones entre la distribución de las dolinas y los diferentes factores medioambientales es de una gran importancia, ya que gracias a estos estudios se pueden distinguir áreas de cierta susceptibilidad que con la simple cartografía de dolinas actuales podrían haber sido consideradas como no susceptibles.

A tenor de lo comentado anteriormente el mapa de probabilidad de formación de dolinas generado utilizando SIG y aplicando la regresión logística es una información valiosa para la planificación del territorio a una escala regional. Sin embargo, existen algunas limitaciones como la imposibilidad de regionalizar algunas variables importantes según estudios anteriores, como es el caso de la localización de estratos de sales o de fallas y diaclasas en los materiales evaporíticos terciarios, o la localización de áreas en las que el Acuífero Terciario descarga en el Cuaternario.

Sería conveniente, por tanto, seguir trabajando en la zona de estudio para mejorar los resultados. Un excelente ejemplo de manejo de este problema puede encontrarse en países como Eslovenia y China, donde los Gobiernos han creado institutos de investigación dedicados al karst (Veni, 1999). Una primera aproximación a este ejemplo podría ser la creación de una base de datos que integrara toda la información cartográfica de estudios anteriores llevados a cabo por diferentes grupos de investigación, así como información geológica, geomorfológica, medioambiental y de carácter antrópico. También sería necesario incrementar la información en las zonas en las que es escasa, como el sector aguas abajo de Zaragoza; y por último, pero no por ello menos importante, sería necesaria una activa cooperación entre los grupos de investigación y los agentes del territorio.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido posible gracias a la subvención del Servicio de Investigación Alemán (DFG, Ho 804/7-1+2) y a la colaboración del Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza. Es necesario dar las gracias a los directores y principal colaborador de este trabajo, Prof. Dr. Andreas Hoppe, Dr. Juan de la Riva y Oswald Marinoni por sus aportaciones en la investigación. Nos gustaría dar las gracias a la Confederación Hidrográfica del Ebro, el Gobierno de Aragón, el Ayuntamiento de Zaragoza, Z-amaltea, Control-7, Entecsa, CTA y ESHYG por la información que nos proporcionaron. Así mismo, nos gustaría agradecer también a Fernando Pérez-Cabello, Maite Echeverría, Asunción Soriano, José Luís Simón, Néstor Jiménez-Torrecilla, Miguel Ángel García-Vera, José Losada, Teresa Carceller, Manuel Arce y Katy Unger-Shayesteh los valiosos consejos que nos brindaron.

Bibliografía

- Alberto, F., Gutiérrez, M., Ibáñez, M.J., Machín, J., Peña, J.L., Pocoví, A., Rodríguez-Vidal, J. (1984). El Cuaternario de la Depresión del Ebro en la región aragonesa. Cartografía y síntesis de los conocimientos existentes. Universidad de Zaragoza. Estación Experimental de Aula Dei, Zaragoza.
- Arlegui, L. y Simón, J.L. (2000). Geometry and distribution of regional joint sets in a non-homogeneous stress field: case study in the Ebro Basin (Spain). *J. Struct. Geol.*, 23: 297-313.
- Ayalew, L. y Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65: 15-31.
- Battaglin, W.A. y Goolsby, D.A. (1997). Statistical modeling of agricultural chemical occurrence in midwestern rivers. *Journal of Hydrology*, 196: 1-25.
- Beguiría, S. y Lorente, A. (2003). *Landslide hazard mapping by multivariate statics: comparison of methods and case study in the spanish pyrenees*. Instituto Pirenaico de Ecología, Contract No EVG1 - CT-1999-00007, disponible en <http://damocles.irpi.pg.cnr.it/docs/reports/df_modeling.pdf>.
- Benito, G. y Gutiérrez-Elorza, M. (1988). Karst in gypsum and its environmental impact on the Middle Ebro Basin Spain. *Environmental Geology Water Sciences*, 12(2): 107-111.
- Benito, G., Gutiérrez-Santolalla, F., Pérez-González, A. y Machado, M.J. (2000). Geomorphological and sedimentological features in Quaternary fluvial systems affected by solution-induced subsidence (Ebro Basin, NE-Spain). *Geomorphology*, 33: 209-224.
- Benito, G., Pérez-Gonzalez, A., Gutiérrez-Santolalla, F. y Machado, M.J. (1998). River response to Quaternary subsidence due to evaporite solution (Gállego River, Ebro Basin, Spain). *Geomorphology*, 22: 243-263.

- Bledsoe, B.P. y Watson, C.C. (2001). Logistic analysis of channel pattern thresholds: meandering, braiding, and incising. *Geomorphology*, 38: 281-300.
- CHE (2005). *Contenido Cartográfico: Regadíos*. Disponible en <<http://oph.chebro.es/ContenidoCartoRegadíos.htm>>.
- Clark, P.J. y Evans, F.C. (1954). Distance to nearest neighbour as measure of spatial relationships in populations. *Ecology* 35: 445-453.
- Cooper, A.H. y Saunders, J.M. (1999). Road and bridge construction across gypsum karst in England. En Beck, B.F., Pettit, A.J. y Herring, J.G. (eds) *Hydrogeology and Engineering Geology of Sinkholes and Karst*, Balkema, Rotterdam, pp. 407-412.
- Cooper, A.H., Farrant, A.R., Adlam, K.A.M. y Walsby, J.C. (2001). The development of a national Geographic Information System (GIS) for the British karst geohazard and risk assessment. En Beck, B.F. y Herring, J.G. (eds) *Geotechnical and Environmental Applications of Karst and Hydrology*, Balkema, Rotterdam, pp. 125-130.
- Cruz, J.M., Reiné, R.R. y de Rivera, F. (1997). Metodología utilizada en el estudio "Dotaciones de riego" borrador del Plan Hidrológico del Ebro. *Riegos y drenajes XXI*, 93: 45-54.
- Custodio, E. y Llamas, M.R. (1983). Hidrogeología subterránea. Barcelona, Omega.
- Cvijic, J. (1981). The dolines: translation of geography. En Sweeting, M.M. (ed) *Karst geomorphology*, Hutchinson, Pennsylvania, pp. 225-276.
- Dai, F.C. y Lee, C.F. (2002). Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 42: 213-238.
- Drake, J.J. y Ford, D.C. (1972). The analysis of growth patterns of two-generation populations: the examples of karst sinkholes. *Can. Geograph.*, 16: 381-384.
- Earth Decision Sciences (2005). GOCAD®, Earth Decision Sciences, Nancy, France.
- ESRI Inc. (2005). *ArcGIS 9.1*, ESRI Inc., Redlands, CA.
- Ford, D. y Williams, P. (1989). *Karst geomorphology and hydrology*, London.
- Gao, Y. y Alexander, E.C. (2003). A mathematical model for a sinkhole probability map in Fillmore County, Minnesota. En Beck, B.F. (ed) *Proceedings of 9th multidisciplinary conference on sinkholes and the engineering and environmental impacts of karsts*, ASCE Geotechnical Special Publication, Huntsville, Alabama, pp. 439-449.
- Gao, Y., Alexander, E.C. y Tipping, R.G. (2001). Application of GIS technology to study karst features of southern Minnesota. En Beck, B.F. y Herring, J.G. (eds) *Geotechnical and Environmental Applications of Karst Geology and Hydrology*, Swets & Zeitlinger, Lisse, pp. 83-88.
- Gao, Y., Alexander, E.C. y Tipping, R.G. (2005). Karstdatabase development in Minnesota: design and data assembly. *Environmental geology*, 47: 1072-1082.
- Green, J.A., Marken, W.J., Alexander, E.C. y Alexander, S.C. (2002). Karst unit mapping using geographic information system technology, Mower County, Minnesota, USA. *Environmental Geology*, 42: 457-461.
- Guerrero, J., Gutiérrez-Santolalla, F. y Lucha, P. (2004). Paleosubsidence and active subsidence due to evaporite dissolution in Zaragoza area (Huerva River valley, NE Spain): processes, spatial distribution and protection measures for transport routes. *Engineering Geology*, 72(3-4): 309-329.
- Gutiérrez-Elorza, M. y Gutiérrez-Santolalla, F. (1998). Geomorphology of the Tertiary gypsum formations in Ebro Depression (Spain). *Geoderma*, 87: 1-29.
- Gutiérrez-Santolalla, F., Gutiérrez-Elorza, M., Marín, C., Desir, G. y Maldonado, C.

- (2005a). Spatial distribution, morphometry and activity of La Puebla de Alfindén sinkhole field in the Ebro river valley (NE Spain): applied aspects for hazard zonation. *Environmental Geology*, 48: 360-369.
- Gutiérrez-Santolalla, F., Gutiérrez-Elorza, M., Marín, C., Maldonado, C. y Younger, P.L. (2005b). Subsidence hazard avoidance based on geomorphological mapping in the Ebro River valley mantled evaporite karst terrain (NE Spain). *Environmental Geology*, 48: 370-383.
- I.T.G.E. (1995). *Mapa Geológico de España a escala 1:50.000: hoja 354-Alagón (27-14)*. Ministerio de Industria y Energía, Madrid.
- I.T.G.E. (1998). *Mapa Geológico de España a escala 1:50.000: hoja 353 Pedrola (26-14), 355 Leciñena (28-14), 383 Zaragoza (27-15), 384 Fuentes de Ebro (28-15)*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Jiménez-Torrecilla, N., Galve, J.P., Asta, M.P. y Sánchez-Navarro, J.A. (2004). *Estudio hidrogeológico de la subsidencia y los humedales salinos en el entorno de Zaragoza*. Informe inédito, Ayuntamiento de Zaragoza y Universidad de Zaragoza, Zaragoza.
- Johnson, K.S. (2005). Subsidence hazard due to evaporite dissolution in the United States. *Environmental geology*, 48: 395-409.
- Kaufmann, O. y Quinif, Y. (2002). Geohazard map of cover-collapse sinkholes in the "Tournaisis" area, southern Belgium. *Engineering Geology*, 65: 117-124.
- Klimchouk, K., Cucchi, J., Calaforra, J., Calaforra, M., Askem, S., Finocchiaro, F. y Forti, P. (1996). Dissolution of gypsum from field observations. *International Journal of Speleology*, 25(3-4): 37-48.
- Lamont-Blanck, J., Younger, P.L., Forth, R.A., Cooper, A.H. y Bonniface, J.P. (2002). A decision-logic framework for investigating subsidence problems potentially attributable to gypsum karstification. *Engineering Geology* 65: 205-215.
- Lee, S. y Min, K. (2001). Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea. *Environmental geology*, 40: 1095-1113.
- Lei, M., Jiang, X. y Li, Y. (2001). New advances of Karst collapse research in China. En Beck, B.F. y Herring, J.G. (eds) *Geotechnical and Environmental Applications of Karst Geology and Hydrology*, Swets & Zeitlinger, Lisse, pp. 145-151.
- M.O.P. (1967). *Proyecto Red arterial de Zaragoza: Autopista Zaragoza -Alfajarín. Tramo II*. Informe inédito, Ministerio de Obras publicas, Zaragoza.
- M.O.P. (1970). *Red arterial de Zaragoza: N-II. Autopista ronda norte. Zaragoza*. Informe inédito, Ministerio de Obras Públicas, Zaragoza.
- M.O.P. (1973). *Proyecto de Trazado de la red arterial de Zaragoza: 2º cinturón de la red arterial de Zaragoza, conexión de la N-II con la N-123*. Informe inédito, Ministerio de Obras Públicas, Zaragoza.
- M.O.P. (1994). *Proyecto de construcción: N-232 de Vinaroz a Santander. P.K. 223,6 al P.K. 234,8. Acceso a población (duplicación de calzada. Tramo: El Burgo de Ebro-Zaragoza*. Informe inédito, Ministerio de Obras Públicas, Zaragoza.
- M.O.P. (2000). *Proyecto de construcción. Conexión de la carretera N-232 de Vinaroz a Santander con la Autopista A-68 de Bilbao a Zaragoza. Tramo Casetas*. Informe inédito, Ministerio de Obras Públicas, Zaragoza.
- M.O.P. (2003). *Proyecto de construcción. Nueva carretera autopista. Ronda sur. Cuarto cinturón de Zaragoza. De la N-II a ña N-232 (Vinaroz)*. Informe inédito, Ministerio de Obras Públicas, Zaragoza.
- Maldonado, C., Gutiérrez-Santolalla, F., Gutiérrez-Elorza, M. y Desir, G. (2000). Distribución espacial, morfometría y acti-

- vidad de la subsidencia por disolución de evaporitas en un campo de dolinas de colapso (Valle del Ebro, Zaragoza). *Cuaternario y Geomorfología*, 14(3-4): 9-24.
- Martínez, J.D., Johnson, K.S. y Neal, J.T. (1998). Sinkholes in evaporite rocks. *American Scientist*, 86: 39-52.
- Martínez-Casasnovas, J.A., Ramos, M.C. y Poesen, J. (2004). Assessment of sidewall erosion in large gullies using multi-temporal DEMs and logistic regression analysis. *Geomorphology*, 58: 305-321.
- Ohlmacher, G.C. y Davis, J.C. (2003). Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslides hazards in northeast Kansas, U.S.A. *Engineering Geology*, 69: 331-343.
- Palmquist, R. (1979). Geologic controls on doline characteristics in mantled karst. *Z. Geomorph. Suppl. Bd.*, 32: 90-106.
- Paukštys, B., Cooper, A.H. y Arustiene, J. (1999). Planing for gypsum geohazard in Lithuania and England. *Engineering Geology*, 52: 93-103.
- Quitantes, J. (1978). *Estudio sedimentológico y estratigráfico del Tercio Continental de los Monegros*. Institución "Fernando el Católico", Zaragoza.
- Sánchez, J.L., Marcos, J.L., de la Fuente, M.T. y Castro, A. (1998). A Logistic Regression Model applied to short term forecast of hail risk. *Phys. Chem. Herat.*, 23(5-6): 645-648.
- Simón, J.L. y Soriano, M.A. (2002). Actual and potencial doline subsidence hazard mapping: Case study in the Ebro basin (Spain). En Bobrowsky, P.T. (ed) *Environmental mapping: methods, theory and practice*, Balkema, Rotterdam, pp. 649-666.
- Simón, J.L., Martínez-Gil, J., Soriano, M.A., Arlegui, L. y Caballero, J. (1998a). *Estudio de riesgos naturales en los terrenos de la orla sudoeste del suelo urbanizable*. Informe inédito, Ayuntamiento de Zaragoza y Departamento de Geología de la Universidad de Zaragoza, Zaragoza.
- Simón, J.L., Soriano, M.A., Arlegui, L. y Caballero, J. (1998b). *Estudio de riesgos de hundimientos Kársticos en el corredor de la carretera de Logroño*. Informe inédito, Ayuntamiento de Zaragoza y Departamento de Geología de la Universidad de Zaragoza, Zaragoza.
- Soriano, M.A. (1992). Characteristics of the alluvial dolines developed due to de dissolution of gypsum materials in the central Ebro Basin (Spain). *Geomorphology*, 85: 59-72.
- Soriano, M.A. y Simón, J.L. (1995). Alluvial dolines in the central Ebro basin, Spain: a spatial and developmental hazard analysis. *Geomorphology*, 11: 295-309.
- Soriano, M.A. y Simón, J.L. (2002). Subsidence rates and urban damages in alluvial dolines of the Central Ebro basin (NE Spain). *Environmental geology* 42:476-484.
- SPSS Inc. (2001). *SPSS 11 for Windows*. SPSS Inc., Chicago, IL.
- Veni, G. (1999). A geomorphological strategy for conducting environmental impact assessments in Karst areas. *Geomorphology*, 31: 151-180.
- Whitman, D. y Gubbels, T. (1999). Application of GIS technology to the triggering phenomena of sinkholes in Central Florida. En Beck, B.F., Pettit, A.J. y Herring, J.G. (eds) *Hydrogeology and Engineering geology of sinkholes and karst*, Balkema, Rotterdam, pp. 67-73.