

EL RIESGO DE DOLINAS DE SUBSIDENCIA EN TERRENOS EVAPORÍTICOS. INVESTIGACIÓN Y MITIGACIÓN

GUTIÉRREZ FRANCISCO

Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, Spain

ABSTRACT

Subsidence activity in evaporitic terranes is generally more active than in carbonate karst areas due to the higher solubility and lower mechanical strength of the evaporites. The generation of sinkholes may cause severe damage to virtually any structure and may threaten human lives when they occur in a catastrophic way. Sinkholes may also hinder the storage of water in reservoirs and facilitate the pollution of aquifers. Although subsidence due to evaporite dissolution causes significant losses in numerous regions of our Planet, it has received a disproportionately scarce attention in comparison with subsidence hazards in carbonate karst areas. Spain is possibly the European country most severely affected by evaporite dissolution subsidence. The evaporites, mainly Triassic and Tertiary in age, cover around 7% of the Spanish territory. The most hazardous zones correspond to areas where Tertiary evaporites are mantled by Quaternary alluvium (alluvial karst), like in the Ebro River valley around Zaragoza city or the Jalón River valley in Calatayud city. In the alluvial karst setting, several dissolution and deformation mechanisms may operate in the generation of sinkholes: (1) Differential lowering of the rockhead and bending of the alluvial cover; (2) Enlargement of discontinuity planes in the top of the bedrock and downward migration (ravelling) of alluvium; (3) Sheet dissolution within the evaporitic bedrock and sagging; (4) Localized dissolution within the bedrock and upward propagation of breccia pipes (stoping). Catastrophic sinkholes commonly develop in areas with "stiff" cover deposits capable of spanning cavities produced by ravelling or stoping processes. Several anthropogenic activities may favour or trigger the genesis of human-induced sinkholes in evaporite karst areas: (1) Extra water supplies to the subsurface; (2) Lowering of the water table; (3) Static and dynamic loading; (4) Construction of reservoirs; (5) Excavations and solution mining; (6) Human-induced thawing of the permafrost; (7) Lowering of the water level in saline lakes. The application of mitigation measures requires the identification of the existing sinkholes and the areas likely to suffer sinkholes in the future (prediction). The recognition of sinkholes is frequently a complex task that needs to be addressed using several methodologies. Surface data may be obtained from field surveys, aerial photographs, remote sensing techniques, topographic maps, geodetic information, accounts from local people, printed sources and the paleokarst. The speleological explorations, drillholes and geophysical investigations are the main methods to obtain subsurface data. The distribution of sinkholes depicted in geomorphological maps helps to identify the a priori most hazardous areas. Some aspects related to the geometry and spatial distribution of sinkholes like the elongation, alignment and clustering-dispersion (nearest-neighbour analysis) may be applied in hazard zonations. Sinkhole susceptibility maps (probabilistic models) may be based on correlations between the spatial distribution of sinkholes and the conditioning factors. It is important to bear in mind that most of the susceptibility (hazard) maps are unchecked hypothesis that should be validated in order to evaluate their prediction capability. Avoiding the most hazardous areas is obviously the safest strategy for development in sinkhole-prone areas. Remediation measures may be oriented to reduce the activity of the dis-

solution and subsidence processes or to reduce the vulnerability of the structures. Commonly subsidence-resistant designs are required given the difficulty of controlling the subsurface processes involved in sinkhole generation.

INTRODUCCIÓN

La karstificación de sedimentos solubles mediante flujos de agua subterránea puede provocar la deformación gravitacional de los materiales suprayacentes y el hundimiento de la superficie del terreno. Estos fenómenos de subsidencia por disolución generalmente se manifiestan en superficie mediante depresiones cerradas denominadas dolinas de subsidencia (sinkholes). La generación de dolinas de subsidencia puede estar relacionada con la disolución de sedimentos carbonatados, evaporíticos e incluso materiales silíceos y lateríticos en climas muy húmedos. Generalmente los fenómenos de subsidencia en terrenos evaporíticos muestran un nivel de actividad muy superior al de los terrenos carbonatados debido a la mayor solubilidad y menor resistencia mecánica de las evaporitas. Así, las solubilidades del yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y de la halita (NaCl), componentes mineralógicos mayoritarios de gran parte de los sedimentos evaporíticos, son de 2,4 y 360 gr/l respectivamente, mientras que las de la calcita y dolomita son habitualmente inferiores a 0,5 gr/l. La generación de dolinas de subsidencia puede tener lugar en distintos contextos según se encuentren los sedimentos evaporíticos aflorando en superficie (karst desnudo-bare karst), bajo materiales litificados no evaporíticos (karst interestratal-interstratal karst), o fosilizados por formaciones superficiales (karst cubierto-mantled karst), utilizándose el término karst aluvial (alluvial karst) cuando la cobertera posee un origen aluvial (Sweeting, 1972; Ford y Williams, 1989). El hundimiento que experimenta el terreno durante el desarrollo de las dolinas de subsidencia puede provocar daños graves en distintos tipos de estructuras (obras lineales, edificios, presas, centrales nucleares, almacenes de residuos), e incluso poner en peligro la vida de las personas cuando éstas se generan de forma catastrófica. Por otra parte, las dolinas, por ser habitualmente vías de acceso a cavidades subterráneas, pueden imposibilitar el almacenamiento de agua en embalses (Milanovic, 2003) o propiciar la contaminación de acuíferos. Debido a la gran extensión que ocupan los sedimentos evaporíticos en buena parte de los continentes, el riesgo de subsidencia por disolución de estos materiales afecta a un gran número de regiones del Planeta. En Estados Unidos la disolución de evaporitas afecta a 32 estados (Johnson, 1997; Martínez et al., 1998). La karstificación de evaporitas ha intervenido en la rotura catastrófica de varias presas (Pearson, 1999) como la de St. Francis (California) en 1928, que causó 450 víctimas mortales. La seguridad de un almacén de residuos radiactivos excavado en sales pérmicas en Nuevo Méjico (WIPP site) ha sido cuestionada por los problemas que puede plantear la karstificación de estas formaciones (Hill, 1996). En Alemania, la subsidencia provocada por la disolución de evaporitas triásicas ha causado problemas a la central nuclear de Neckarwestheim (H. Behmel, com. pers.). Los edificios de las ciudades de Ripon y Darlington en el NE de Inglaterra sufren con asiduidad daños graves por la aparición brusca de colapsos relacionados con la karstificación de yesos pérmicos (Cooper, 1995). Otras zonas afectadas por el riesgo de subsidencia por disolución de evaporitas son la ciudad de Paris (Toulemont, 1984), algunas poblaciones de Ucrania occidental (Andrajchouk y Klimchouk, 1993) (Fig. 1A), las localidades de Birzai y Pasvalys en Lituania (Paukstys, 1996), el área de Sivas en Turquía (Karacan y Yilmaz, 1997), las costas israelitas y jordanas del Mar Muerto (Taqiuddin et al., 2000; Frumkin y Raz, 2001), determinados sectores de Arabia Saudí (Amin y Bankher, 1997) o la ciudad de Mosul en Irak (Jassim et al., 1997).

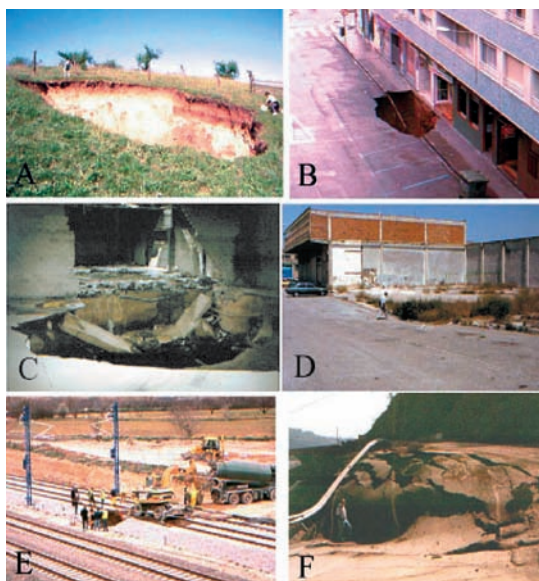


Fig.1 - (A) Dolina de colapso generada por disolución de yesos miocenos en Ucrania occidental, (B) Colapso formando en noviembre de 2003 en Calatayud. El edificio adyacente será demolido, (C) Dolina generada de forma catastrófica en el interior de una nave del Polígono Europa (Zaragoza), (D) Dolina generada por flexión en el Polígono El Portazgo (Zaragoza). La nave situada en el solar afectado tuvo que ser demolida, (E) Dolina afectando a la línea de alta velocidad Madrid-Zaragoza-Lérida (Marzo, 2003), (F) Carretera afectada por un fenómeno de subsidencia debido a la disolución de sal en Cardona

España es posiblemente el país europeo en el que el riesgo de subsidencia por disolución de evaporitas tiene una mayor repercusión socio-económica. Estos fenómenos se deben fundamentalmente a la karstificación de formaciones triásicas y terciarias, cuyo afloramiento ocupa una extensión de unos 35.000 km², aproximadamente un 7% de la superficie del país (Gutiérrez et al., 2001) (Fig. 2). Los sedimentos evaporíticos están formados mayoritariamente por yeso y anhidrita, o yeso, anhidrita y halita. Algunas formaciones también contienen proporciones significativas de cloruros potásicos y magnésicos (marinas) o sulfatos sódicos (continentales), minerales con solubilidades por encima de los 100 g/l. Los mayores problemas se registran en zonas donde los sedimentos evaporíticos terciarios se encuentran cubiertos por depósitos cuaternarios de origen aluvial (karst aluvial). Esta situación se produce en determinados tramos de los valles excavados por algunos de los principales sistemas fluviales como los ríos Ebro y Tajo (Gutiérrez et al., 2001). Estas zonas, en las que la subsidencia es más activa, son frecuentemente las áreas que presentan una mayor ocupación humana, produciéndose situaciones de alto riesgo.

Las zonas en las que la generación de dolinas de subsidencia causa daños más importantes son: (1) El sector SE del área metropolitana de Madrid, donde se han visto afectadas por subsidencia la autovía M-45 y poblaciones como Rivas-Vaciamadrid. (2) La ciudad de Calatayud, en la que la mayoría de los edificios antiguos, incluyendo monumentos de gran valor histórico-artístico, se encuentran severamente dañados por subsidencia (Gutiérrez, 1996, 1998; Gutiérrez y Cooper, 2002). En noviembre de 2003, un edificio de esta ciudad con 5 plantas y 52 viviendas se vio afectado por un colapso súbito (Fig. 1B), dañando seriamente su estructura y haciendo necesaria su demolición. Las pérdidas económicas relacionadas con este evento rondan los 5 millones de euros (Gutiérrez et al., 2004a). (3) El entorno de la ciudad de Zaragoza es la zona donde la subsidencia causa mayores perjuicios. Ya en 1790 la construcción del Canal Imperial de Aragón tuvo que ser detenida 50 kilómetros antes de su punto de destino ante la imposibilidad de encontrar remedio a las continuas dolinas que afectaban la estructura (Sástago, 1796). En 1980, el pueblo de colonización de Puilatós fue demolido por problemas de estabilidad debidos a la subsidencia kárstica (Benito et al., 1995). En las inmediaciones del Burgo de Ebro, un tren de mercancías descarriló en los años 80 como

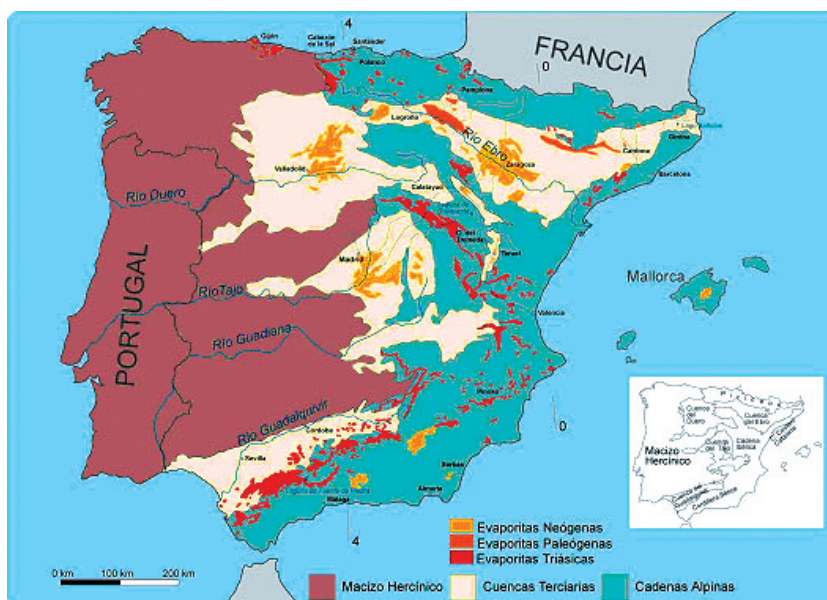


Fig.2 - Distribución de los principales afloramientos de evaporitas en España y localización de algunas de las áreas más problemáticas

consecuencia de la formación repentina de un colapso (Gutiérrez et al., 2004b). Los daños por dolinas de subsidencia son muy frecuentes en el tramo del valle del Ebro situado aguas arriba de Zaragoza (Soriano y Simón, 2002). En este sector, algunos edificios y naves industriales, en ocasiones construidos sobre dolinas colmatadas, han sido afectados por la aparición súbita de colapsos (Fig. 1C y D). En Marzo de 2003, un colapso afectó a la línea del tren de alta velocidad Madrid-Zaragoza antes de su inauguración (Guerrero et al., 2004) (Fig. 1E). Este evento impulsó un polémico debate con escaso contenido científico-técnico sobre el riesgo potencial al que se encuentra sometida esta infraestructura altamente vulnerable y que atraviesa zonas con una probabilidad de ocurrencia de dolinas elevada.

Otras de las zonas del territorio español afectadas por el riesgo de subsidencia son: el valle del Fluviá y la cuenca del Lago Bañolas en Gerona, el valle del Alfambra en Teruel (Gutiérrez, 1996), el Anticlinal de Barbastro (Lucha et al., 2003). En determinados lugares los procesos de disolución y subsidencia son favorecidos o desencadenados por prácticas mineras. Este es el caso de Cardona (Fig. 1F) o Sallent en Cataluña, donde se explota sal por excavación subterránea, o Pinoso (Alicante) y Polanco (Cantabria), donde la sal se extrae mediante minería por disolución.

1. PROCESOS, FACTORES E INFLUENCIA DE LAS ACTIVIDADES HUMANAS

Las dolinas de subsidencia son la manifestación superficial de procesos de disolución subyacente (componente hidrogeológico) y procesos de deformación y hundimiento (componente mecánico). Dado que estos procesos actúan fundamentalmente bajo la superficie, buena parte de la información que disponemos sobre los mismos es obtenida mediante exploraciones espeleológicas y a partir del estudio de las estructuras de subsidencia registradas en el paleokarst. La generación de dolinas de subsidencia en karst aluviales puede tener lugar mediante diversos mecanismos (Beck, 1988; Gutiérrez y Gutiérrez, 1998; Guerrero et al., 2004) (Fig. 3):

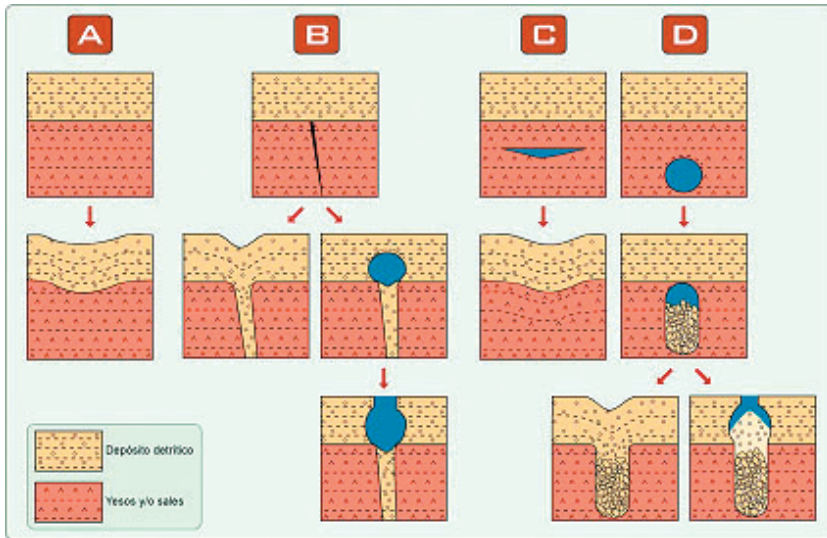


Fig.3 - Origen de las dolinas de subsidencia en un contexto de karst aluvial. En la naturaleza pueden encontrarse múltiples situaciones intermedias

(A) El agua que circula a través del acuífero detrítico puede provocar un rebajamiento diferencial del techo del sustrato evaporítico con el consecuente asentamiento por flexión de la cobertera aluvial (Fig. 4A). Estos mecanismos de subsidencia dan lugar a depresiones de escasa profundidad y márgenes difusos (Fig. 1D). Es importante tener presente que la generación de dolinas no precisa de la existencia de cavidades en profundidad. (B) En ocasiones el agua que circula por el acuífero kárstico-aluvial provoca el ensanchamiento de discontinuidades en el sustrato soluble generando fisuras o conductos de disolución. Si el depósito aluvial es blando, éste tiende a migrar a través de las fisuras por procesos de arrastre hídrico o mediante flujos de sedimento (viscosos o granulares) (Fig. 4B y C), asentándose la cobertera de forma dúctil (Fig. 4D) y dando lugar a depresiones con márgenes no escarpados, a menudo cónicas. Cuando el depósito detrítico posee un comportamiento frágil, se produce la caída de partículas generándose una cavidad en los depósitos aluviales cuyo techo generalmente posee una geometría en cúpula. La caída continuada de partículas favorecida por el desarrollo de grietas de descarga produce un progresivo avance de la cavidad hacia la superficie. Cuando el peso del techo de la cavidad supera la resistencia mecánica del material, se genera una dolina de colapso con paredes subverticales y a menudo extraplomadas (Fig. 1). Los márgenes escarpados de estas dolinas de colapso tienden a reducir su inclinación mediante movimientos de ladera y procesos de erosión hasta alcanzar el ángulo de reposo, ampliando así su diámetro (Fig. 4E). Este tipo de dolinas es el que entraña mayor peligro puesto que generalmente se produce de forma violenta y sin previo aviso, pudiendo poner en peligro la vida de las personas. (C) También existe la posibilidad de que la disolución actúe en el seno de las formaciones evaporíticas. Cuando ésta opera de forma generalizada afectando a niveles estratigráficos concretos, en ocasiones sales intercaladas en series yesíferas, se puede producir la flexión tanto de la cobertera aluvial como de los materiales evaporíticos situados por encima de la zona karstificada (Fig. 4F). En estos casos se generan dolinas someras como las del primer caso descrito. (D) Otra opción es que la disolución actúe de forma localizada dentro del sustrato evaporítico dando lugar a cavidades de disolución de geometría variables (Fig. 4G). Estas cavidades, situadas en ocasiones a cientos de metros de profundidad (Hill, 1996; Warren, 1999), tienden a migrar hacia la superficie mediante la caída de bloques del techo. Este proceso da lugar

a un conducto relleno de material brechoide conocido como chimenea de colapso (breccia pipe). Una vez que la cavidad alcanza la base de la cobertera aluvial, los procesos de deformación y hundimiento dependerán, como en el caso B, de la reología del depósito aluvial, pudiéndose generar dolinas por flexión y colapso. Estos modelos genéticos plantean situaciones extremas, sin embargo en la naturaleza es frecuente encontrar múltiples combinaciones de las mismas (Fig. 4H). Por otra parte, la generación de dolinas en contextos de karst desnudo e interestratal son asimilables a los modelos C y D.

Los fenómenos de subsidencia por disolución están controlados por diversos factores (Gutiérrez y Gutiérrez, 1998). Entre los que afectan a los procesos de disolución destacan la composición (mineralogía y litología), estructura y textura de las evaporitas, la cantidad de agua en contacto con el material soluble y sus propiedades físico-químicas (grado de saturación, temperatura), el tipo de flujo (laminar o turbulento y freático o vadoso) o las variaciones del nivel freático y de la presión hidrostática. Los principales factores que controlan los procesos de hundimiento son el espesor y las propiedades mecánicas de los materiales situados por encima de las cavidades o zonas afectadas por karstificación y la posición del nivel freático y sus variaciones.

Con frecuencia determinadas actividades humanas aceleran los procesos que intervienen en los fenómenos de subsidencia favoreciendo o desencadenando la formación de dolinas inducidas (human-induced sinkholes). Algunas de las intervenciones humanas que pueden propiciar el desarrollo de dolinas son: (1) Los aportes de agua al subsuelo por prácticas de riego o pérdidas en canales y conducciones (Maldonado et al., 2000); (2). Los descensos del nivel freático por bombeo, los cuales provocan un aumento del peso efectivo de los materiales por la disminución del empuje de Arquímedes (Lamoreaux y Newton, 1986). (3)

La aplicación de cargas estáticas (construcciones) o dinámicas (sismos o explosiones) (Tharp, 1999); (4) La construcción de embalses (Pearson, 1999); (5) Las excavaciones tanto superficiales como subterráneas (Martínez et al., 1998; Guerrero et al., 2004) (Fig. 1F). (6) La fusión del permafrost (Eraso, 1995); (7) El descenso del nivel de lagos salinos (Frumkin y Raz, 2001).

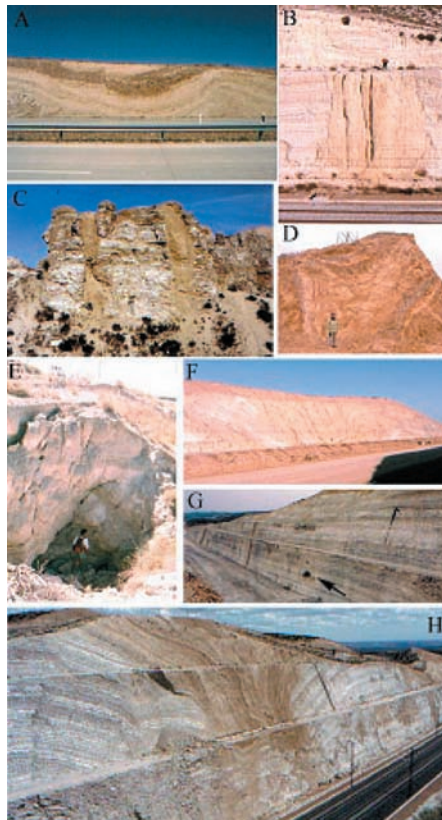


Fig. 4 - (A) Flexión de una cobertera aluvial por disolución de los yesos infrayacentes (Calatayud), (B) Conducto de disolución relleno de material detrítico en la línea de alta velocidad Madrid-Zaragoza (LAV), (C) Conductos de disolución (cutters o grikes) rellenos de material procedente de la cobertera suprayacente (Zaragoza); (D) Flexión sinsedimentaria en depósitos de terraza provocada por la disolución del sustrato (Calatayud). Prof. Derek Ford de escala, (E) Grietas de descarga en el margen de una dolina de colapso (La Puebla de Alfindén, Zaragoza), (F) Flexión afectando a la cobertera

2. IDENTIFICACIÓN DE ZONAS AFECTADAS POR SUBSIDENCIA Y EVALUACIÓN DE LA PELIGROSIDAD

Para la aplicación de medidas de mitigación es preciso identificar las zonas afectadas por subsidencia, y en la medida de lo posible, predecir que sectores pueden verse afectados por estos fenómenos en el futuro. Frecuentemente la identificación de las zonas afectadas no es una tarea inmediata debido a diversas razones: (1) Las dolinas pueden quedar enmascaradas por actividades humanas (relleno, urbanización) o por procesos naturales (sedimentación o erosión). (2) La expresión morfológica de las dolinas puede ser poco evidente. (3) Los procesos de subsidencia pueden no haber llegado a manifestarse en superficie. Hay que tener presente que las dolinas actualmente observables pueden no representar la totalidad de las zonas afectadas por subsidencia. Por ello es preciso recurrir a una amplia variedad de fuentes de información y datos tanto de superficie como del subsuelo.

2.1. Datos de superficie

2.1.1. Fotografías aéreas y teledetección

Las fotografías aéreas son una herramienta de gran utilidad para los análisis de peligrosidad por subsidencia. Las imágenes tomadas en años previos pueden ayudar a localizar dolinas que han quedado ocultas (Gutiérrez et al., 2004b). Por otra parte, el análisis de fotografías aéreas tomadas en distintas fechas suministra información cronológica sobre la generación de las dolinas. Otro tipo de técnicas de teledetección como la interferometría de radar, puede ayudar a localizar zonas sometidas a una subsidencia gradual, así como a cuantificar la velocidad de la deformación (Baer et al., 2002).

2.1.2. Reconocimientos de campo

Las observación directa sobre el terreno permite identificar dolinas que por su reducido tamaño o escaso relieve no son apreciables en fotografías aéreas. En los casos en los que las depresiones han quedado ocultas o son poco evidentes, algunos rasgos como la presencia de vegetación palustre o halófila, encharcamientos, sedimentos característicos de zonas encharcadas (facies palustres), drenes o eflorescencias salinas, ayudan a inferir zonas afectadas por subsidencia (Gutiérrez et al., 2004b). Mediante los reconocimientos de campo también es posible detectar indicios de inestabilidad tales como grietas, escarpes o conductos. Este tipo de evidencias morfológicas aportan información sobre la actividad y cronología de las dolinas y pueden servir como indicadores precursores para anticipar en qué puntos se formará una dolina. En las zonas urbanizadas las zonas afectadas por subsidencia se manifiestan mediante deformaciones en el pavimento y las estructuras (concauidades, grietas, cizallamientos, basculamientos, roturas en conducciones). En estos casos cabe la posibilidad de elaborar mapas de daños como se ha llevado a cabo en la ciudad de Ripon en Inglaterra (Griffin, 1986) y en la ciudad de Calatayud en España (Gutiérrez, 1998; Gutiérrez y Cooper, 2002). Estos documentos aportan información sobre la distribución espacial de la subsidencia y ayudan a interpretar los factores naturales y artificiales que controlan el fenómeno.

2.1.3. Información topográfica y geodésica

Las curvas de nivel de los mapas topográficos de detalle ayudan a detectar depresiones someras difíciles de reconocer en campo o mediante interpretaciones fotogeomorfológicas (Kasting y Kasting, 2003). En ocasiones los mapas topográficos antiguos e incluso los topónimos permiten localizar dolinas enmascaradas por actividades humanas. Diversas técnicas geodésicas como la fotogrametría digital, los modelos digitales del terreno y los GPS de alta resolución pueden ser aplicadas para la identificación de zonas afectadas por subsidencia y la cuantificación del fenómeno.

2.1.4. Información oral y fuentes impresas

En determinadas regiones los habitantes del lugar y determinados documentos escritos (periódicos locales, archivos, tratados) pueden aportar datos muy valiosos sobre la distribución espacial y temporal de los fenómenos de subsidencia (Beck, 1991). Las dolinas que se forman en los campos de cultivo son habitualmente colmatadas por los agricultores poco tiempo después de su formación, pudiendo éstos indicar su ubicación.

2.1.5. Estudio del paleokarst

Las estructuras de subsidencia observables en afloramientos (naturales y artificiales) suministran una valiosa información sobre diversos aspectos: (1) Dónde ha actuado la subsidencia en el pasado; (2) Cómo ha actuado la subsidencia (procesos y mecanismos); (3) Dónde puede actuar en el futuro. La experiencia demuestra como las dolinas pueden ser resultado de la reactivación de un paleokarst generado en tiempos pretéritos. En algunas zonas se ha observado una buena correlación entre la localización de estructuras de subsidencia antiguas y la de nuevas dolinas (Gutiérrez, 1998) (Fig. 5A). Por esta razón, el paleokarst puede ser utilizado como herramienta de predicción espacial, señalando puntos especialmente susceptibles a ser afectados por subsidencia. Para el análisis de las estructuras de subsidencia registradas en el paleokarst (eventos, cronología) pueden aplicarse algunas de las metodologías utilizadas en investigaciones paleosismológicas (McCalpin, 1996).

2.2. Datos de subsuelo

2.2.1. Exploraciones espeleológicas

Un fuente de información especialmente valiosa y a menudo obviada son las exploraciones espeleológicas. El estudio del endokarst puede aportar información sobre: 1) La distribución de las cavidades accesibles. 2) La localización de los puntos donde se produce el avance del techo de cavidades hacia la superficie pudiendo eventualmente dar lugar a una dolina en un futuro próximo. La exploración de la cueva Zoloushka en Ucrania occidental ha permitido elaborar cartografías de las galerías y de los puntos en los que actúan procesos de hundimiento que no han llegado a manifestarse en superficie. Estos puntos pueden reconocerse con relativa facilidad por la existencia de conos de material detrítico en la base de las cavidades (Fig. 5B) o chimeneas de colapso en el techo (Andrajchouk y Klimchouk, 1993). Estos documentos son quizás los mapas de susceptibilidad de subsidencia más fiable, aunque se basan en la identificación de un fenómeno en curso más que en su predicción.

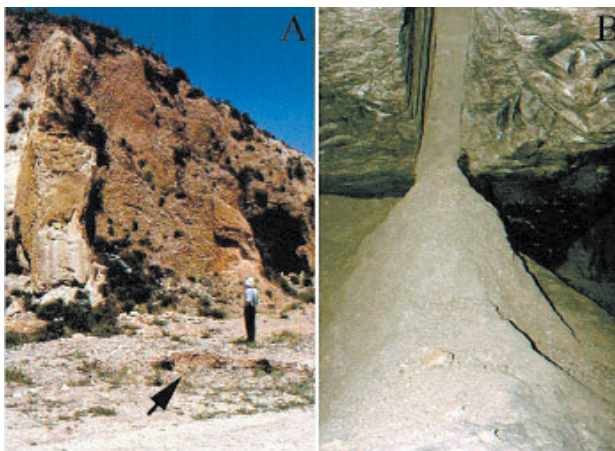


Fig. 5 - (A) Colapso activo a los pies del Dr. A. Cooper junto a paleocolapso afectando a depósitos de terraza en Villalba Baja (Teruel), (B) Cono de detritos en la Cueva Mlynki desarrollada en yesos miocenos (Ucrania occidental).

2.2.2. Sondeos

Una de las técnicas de estudio más frecuentemente utilizadas en zonas en las que se va a llevar a cabo algún tipo de construcción son los sondeos mecánicos. Sin embargo, además de ser relativamente costosos, la información que suministran plantea una serie de limitaciones que deben ser tenidas en cuenta: (1) Generalmente no permiten detectar de forma fiable las zonas afectadas por subsidencia por flexión sin generación de cavidades (Fig. 4A). (2) Su capacidad para detectar cavidades es limitada a no ser que se lleven a cabo con un espaciado reducido (Cooper y Calow, 1998) (Fig. 3G). (3) Las interpretaciones vertidas a partir de los datos de sondeo en ocasiones poseen un alto grado de incertidumbre ya que las estructuras pueden ser muy complejas (Fig. 3H).

2.2.3. Investigación geofísica

La investigación geofísica ayuda a detectar cavidades, estructuras de subsidencia o zonas anómalas que pueden posteriormente ser investigadas de forma directa mediante sondeos. Existe una amplia variedad de métodos cuya idoneidad depende de factores tales como el contexto geológico o el nivel de resolución y el alcance requeridos. Los más utilizados en este tipo de estudios son: la microgravimetría, la tomografía eléctrica, el método electromagnético (EM), el GPR (ground penetrating radar) y la sísmica de reflexión de alta resolución. Hoover (2003) expone una revisión de las ventajas e inconvenientes de la aplicación de los distintos métodos en zonas kársticas.

2.3. Evaluación de la peligrosidad

La información espacio-temporal sobre la generación de dolinas que suministran las fotografías aéreas seriadas, los documentos escritos o la información oral permite estimar la probabilidad de ocurrencia de dolinas en una zona determinada (número de dolinas/km² año) (Beck, 1991). Así por ejemplo, una zona de 1 km² con una probabilidad de ocurrencia de dolinas de 0,2 dolinas/km² año se verá afectada por una dolina cada 5 años de promedio. Esta es una medida de la peligrosidad que puede ser utilizada en las evaluaciones de riesgo utilizando expresiones del tipo:

$$R = P E V$$

donde P (peligrosidad) es la probabilidad anual de que una zona determinada se vea afectada por una dolina (número de dolinas/año), E (exposición) es el número de personas y el valor de los elementos humanos existentes en esa zona y susceptibles de ser afectados por la generación de una dolina, V (vulnerabilidad) es el tanto por uno de la exposición que se espera sea dañado en caso de que se genere una dolina y R (riesgo) son los daños anuales esperables en una zona por la generación de dolinas (víctimas/año, euros/año).

3. PREDICCIÓN

Una vez identificadas las zonas afectadas por subsidencia, el paso siguiente en el análisis de peligrosidad es la predicción espacio-temporal del fenómeno. Queremos saber dónde y cuándo se formarán dolinas en el futuro. La predicción temporal tiene una doble vertiente. Por un lado consiste en estimar la frecuencia con la que se forman dolinas en un zona determinada (número de dolinas /km² año) y por otro anticipar el momento en el que se formará una dolina. En la actualidad no es posible predecir de forma satisfactoria el momento y el lugar en el que se generará una nueva dolina. Quizás el des-

arrollo de sistemas de vigilancia o monitorización basados en la detección de microdeformaciones con sismógrafos, variaciones del nivel piezométrico y alteraciones en la topografía permitan avanzar en este sentido (V. Buchignani, com. pers.)

La predicción espacial puede abordarse a través de diversas estrategias:

- La distribución espacial de las dolinas o zonas afectadas por subsidencia permite reconocer a grandes rasgos las zonas a priori más susceptibles de sufrir subsidencia en el futuro. En este sentido, los mapas de densidad de dolinas derivados de los mapas geomorfológicos son de gran utilidad.
- También es posible elaborar mapas de susceptibilidad de subsidencia mediante comparaciones o correlaciones entre la distribución espacial de las dolinas y los factores condicionantes (litología, espesor de cobertera, posición del freático, etc.) utilizando sistemas de información geográfica (GIS) (Kaufmann y Quinif, 2002). Uno de los mayores obstáculos para la aplicación de este tipo de metodologías es la obtención de información sobre los factores condicionantes con un nivel de detalle suficiente. Estas correlaciones nos permiten compartimentar el territorio en zonas con distintos niveles de susceptibilidad o propensión a verse afectadas por subsidencia.
- Algunos aspectos relacionados con la geometría de las dolinas y su distribución espacial pueden ser utilizados con fines predictivos: (1) En zonas donde las dolinas presentan direcciones de alargamiento y alineaciones preferentes por un control estructural podemos plantear que: (i) las zonas de los márgenes de las dolinas situados en la dirección de alargamiento son potencialmente más peligrosas que el resto; (ii) las franjas situadas entre dolinas alineadas en las direcciones preferentes pueden considerarse como zonas potencialmente más susceptibles (Gutiérrez et al., 2004c). (2) El estudio de la distribución espacial de dolinas mediante el análisis del vecino más cercano (nearest neighbour analysis) permite cuantificar el grado de dispersión o agrupación (clustering) de las dolinas (Williams, 1972). Este tipo de análisis puede ser utilizado para comprobar si las dolinas recientes tienden a formarse en zonas adyacentes o alejadas de las preexistentes (Kemmerly, 1982) y contrastar así si la distribución de dolinas posee una validez predictiva (Hyatt et al., 1999; Gutiérrez et al., 2004c)

Debe tenerse en cuenta que los mapas de susceptibilidad han de ser considerados como hipótesis no contrastadas por las siguientes razones: (1) Están basados en una información que por su limitada cantidad y calidad puede no reflejar de forma fiable la realidad. (2) En la elaboración de los mapas de susceptibilidad asumimos implícitamente que la subsidencia tendrá un comportamiento en el futuro semejante al del pasado (Cendrero, 2003). Puede suceder que tras la elaboración de un mapa de susceptibilidad, buena parte de las nuevas dolinas aparezcan en zonas a las que se le había asignado una susceptibilidad baja, lo que indicaría que nuestros pronósticos no son satisfactorios. Por este motivo es conveniente comprobar la fiabilidad de estas predicciones mediante la aplicación de métodos de validación como los ya utilizados en la contrastación de modelos de predicción de deslizamientos (Remondo et al., 2003).

4. MITIGACIÓN

Una vez identificadas las zonas afectadas por subsidencia y las zonas susceptibles de experimentar estos fenómenos en el futuro, lógicamente la estrategia de mitigación más segura consiste en evitar las zonas potencialmente peligrosas. Esta medida preventiva pueden ponerse en práctica mediante la planificación territorial y el desarrollo de normativas orientadas a limitar los usos en dichas zonas (Paukstys et al., 1999; Richardson, 2003).

En los casos en los que se produce la ocupación de zonas potencialmente peligrosas por personas o elementos humanos, la reducción del riesgo debe basarse en la aplicación

de medidas correctivas encaminadas a reducir la actividad de los procesos (peligrosidad) o la vulnerabilidad de los elementos humanos. Dado que los procesos que intervienen en los fenómenos de subsidencia son difícilmente controlables por actuar bajo la superficie, las medidas correctivas frecuentemente deben centrarse en la protección de las estructuras. Entre las medidas orientadas a controlar los procesos se incluyen (Milanovic, 2003): (1) Impermeabilización de superficies con geotextiles; (2) Taponamiento de sumideros (swallow holes) o construcción de diques anulares en su entorno; (3) Revestimiento de canales y acequias y utilización de conducciones especiales en redes de abastecimiento y saneamiento; (4) Limitación de las prácticas de riego y bombeo; (5) Relleno de cavidades mediante cementos que fraguan en profundidad (grouting) (Sowers, 1996); (6) Construcción de pantallas de impermeabilización bajo presas.

Entre las medidas orientadas a reducir la vulnerabilidad de las estructuras se incluyen: (1) Cimentaciones especiales en edificios (Cooper y Calow, 1998); (2) Para evitar colapsos súbitos en vías de comunicación se recurre a geotextiles con alta resistencia a la tensión (Cooper y Saunders, 2002). Para evitar cualquier tipo de deformación, las líneas de tren de alta velocidad precisan de estructuras rígidas tipo losa cuya seguridad puede ampliarse mediante pilotaje (Guerrero et al., 2003). (3) En puentes se diseñan estructuras capaces de prescindir de un pilar o pilares con bases de gran tamaño (Cooper y Saunders, 2002). Un parámetro crítico de diseño es el tamaño máximo de la dolina en el momento de su formación, el cual puede ser obtenido mediante el estudio del registro geológico e histórico. Los daños en personas pueden evitarse mediante sistemas de vigilancia y alarma (Tolmachev, 1999), el vallado de dolinas y zonas peligrosas, señales de alerta y programas educativos orientados a adecuar la percepción del riesgo (Buskirk et al., 1999).

Determinadas medidas de corrección, aunque contribuyen a mitigar los daños a estructuras, pueden no justificarse económicamente. La rentabilidad de las mismas puede evaluarse para intervalos de tiempo variables mediante análisis costos-beneficios en los que se suman y comparan los gastos en los escenarios de "sin mitigación" y "con mitigación" (Cooper y Calow, 1998). Sin embargo, cuando existe la posibilidad de que la subsidencia cause víctimas mortales, la seguridad de las personas debiera prevalecer sobre criterios de índole económica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMIN A. & BANKHER K (1997) - Karst hazard assessment of eastern Saudi Arabia. *Natural Hazards*, **15**, 21-30.
- ANDRAJCHOUK V. & KLIMCHOUK A. (1993) - Environmental change and human impact on karst in the Western Ukraine. In: P. Williams (Ed.): "Karst terrains, environmental change and human impact", *Catena Suppl.* **25**, 147-160.
- BAER G., SCHATTNER U., WACHS D., SANDWELL D., WADOWINSKI S. & FRYDMAN S. (2002) - The lowest place on Earth is subsiding. An InSAR (interferometric synthetic aperture radar) perspective. *GSA Bulletin*, **114**, 12-23.
- BECK B.F. (1988) - Environmental and engineering effects of sinkholes - The processes behind the Problems. *Environ. Geol. Water Sci.*, **12**, 71-78.
- BECK B.F. (1991) - On calculating the risk of sinkhole collapse. In: E.H. Kastning, & K.M. Kastning (Eds.): "Appalachian karst. Proceedings of the Appalachian karst symposium". National Speleological Society, 231-236. Radford, Virginia.
- BENITO G., PÉREZ DEL CAMPO P., GUTIÉRREZ-ELORZA M. & SANCHO C. (1995) - Natural and human-induced sinkholes in gypsum terrain and associated environmental problems in NE Spain. *Environmental Geology*, **25**, 156-164.

- BUSKIRK E.D., PAVELK M.D. & STRASZ R. (1999) – Education about and management of sinkholes in karst areas: initial efforts in Lebanon. In: B.F. BECK (Ed.): “Hydrogeology and engineering geology of sinkholes and karst”, 263-266. A.A. Balkema, Rotterdam.
- CENDRERO A. (2003) - De la comprensión de la historia de la Tierra al análisis y predicción de las interacciones entre seres humanos y medio natural. Discurso de recepción. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Madrid, 60 p.
- COOPER A.H. (1995) - Subsidence hazards due to the dissolution of Permian gypsum in England: Investigation and remediation. In: B.F. Beck (Ed.): “Karst geohazards. engineering and environmental problems in karst terrane”. Proceedings of the fifth multi-disciplinary conference on sinkholes and the environmental impacts of karst, 23-29. A.A. Balkema, Rotterdam.
- COOPER A.H. & CALOW R.C. (1998) - Avoiding gypsum geohazards: guidance for planning and construction. BGS Technical Report WC/98/5, 57 p.
- COOPER A.H. & SAUNDERS J.M., (2002) - Road and bridge construction across gypsum karst in England. *Engineering Geology*, **65**, 217-223.
- ERASO A., TRZHTSINSKIY Y. & CASTRILLO A. (1995) - Dolinas de colapso y karst en yeso en la plataforma cámbrica del este de Siberia. *Boletín Geológico y Minero*, **106-4**, 373-378.
- FORD D.C. & WILLIAMS P. (1989) - Karst geomorphology and hydrology. Unwin Hyman, London, 601 p.
- FRUMKIN A. & RAZ E. (2001) - Collapse and subsidence associated with salt karstification along the Dead Sea. *Carbonates and Evaporites*, **16**, 117-130.
- GRIFFIN D.A. (1986) - Geotechnical assesment of subsidence in and around Ripon, North Yorkshire, due to natural solution. Master Thesis. University of Newcastle upon Tyne, 85 p. (inédito).
- GUERRERO J., GUTIÉRREZ, F. & LUCHA P. (2004) - Paleosubsidence and active subsidence due to evaporite dissolution in the Zaragoza city area (Huerva River valley, NE Spain). Processes, spatial distribution and protection measures for linear infrastructures. *Engineering Geology*, **72**, 309-329
- GUTIÉRREZ F. (1996) - Gypsum karstification induced subsidence: Effects on alluvial systems and derived geohazards (Calatayud Graben, Iberian Range, Spain). *Geomorphology*, **16**, 277-293.
- GUTIÉRREZ F. (1998) - Subsidence phenomena due to evaporite solution in Teruel and Calatayud Neogene Grabens (Iberian Range). Ph. D. Thesis. University of Zaragoza, 569 p. (inédito).
- GUTIÉRREZ F., ORTÍ F., GUTIÉRREZ-ELORZA M., PÉREZ-GONZÁLEZ A., BENITO G., GRACIA-PRIETO J. & DURÁN J.J. (2001) - The stratigraphical record and activity of evaporite dissolution subsidence in Spain. *Carbonates and Evaporites*, **16**, 46-70.
- GUTIÉRREZ F. & COOPER A.H. (2002) - Evaporite dissolution subsidence in the historical city of Calatayud, Spain: damage appraisal and prevention. *Natural Hazards*, **25**, 259-288.
- GUTIÉRREZ F., LUCHA P. & GUERRERO J. (2004a) - La dolina de colapso de la casa azul de Calatayud (noviembre de 2003). Origen, efectos y pronóstico. VII Reunión Nacional de Geomorfología, en prensa.
- GUTIÉRREZ-SANTOLALLA F., GUTIÉRREZ-ELORZA M., MARÍN C., MALDONADO C. & YOUNGER P.L. (2004b) - Subsidence hazard avoidance based on geomorphological mapping. The case study of the Ebro River valley mantled karst (NE Spain). *Environmental Geology*, en prensa.
- GUTIÉRREZ-SANTOLALLA F., GUTIÉRREZ-ELORZA M., MARÍN C., DESIR, G. & MALDONADO C. (2004c) - Spatial analysis and activity of a sinkhole field in the Ebro River valley (NE Spain). Applied aspects for hazard zonation. *Environmental Geology*, en prensa.
- GUTIÉRREZ M. & GUTIÉRREZ F. (1998) - Geomorphology of the Tertiary gypsum formations in the Ebro Depression (Spain). *Geoderma*, **87**, 1-29.

- HILL C. (1996) - Geology of the Delaware Basin, Guadalupe, Apache, and Glass Mountains, New Mexico and West Texas. Permian Basin Section-SEPM. Publication 96-39, 440 p.
- HOOVER R.A. (2003) - Geophysical choices for karst investigations. In: B.F. Beck (Ed.): "Sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst", 529-538. ASCE, Reston.
- HYATT J., WILKES H. & JACOBS P. (1999) - Spatial relationship between new and old sinkholes in covered karst, Albany, Georgia, USA. In: B.F. BECK, A.J. PETTIT & J.G. HERRING (Eds.): "Hydrogeology and engineering geology of sinkholes and karst". Proceedings of the seventh multidisciplinary conference on sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst, 37-44. A.A. Balkema, Rotterdam.
- JASSIM S.Z., JIBRIL A.S. & NUMAN N.M.S. (1997) - Gypsum karstification in the Middle Miocene Fatha Formation, Mosul area, northern Iraq. *Geomorphology*, **18**, 137-149.
- JOHNSON K.S. (1997) - Evaporite karst in the United States. *Carbonates and Evaporites*, **12**, 2-14.
- KARACAN E. & YILMAZ I. (1997) - Collapse dolines in Miocene gypsum: an example from SW Sivas (Turkey). *Environmental Geology*, **29**, 263-266.
- KASTING K.M. & KASTING E.H. (2003) - Site characterization of sinkholes based on resolution of mapping. In: B.F. Beck, B.F. (Ed.): "Sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst", 72-81. ASCE, Reston.
- KAUFMAN O. & QUINIF Y. (2002) - Geohazard map of cover-collapse sinkholes in the Tournaisis area, southern Belgium. *Engineering Geology*, **65**, 117-124.
- KEMMERLY P.R. (1982) - Spatial analysis of a karst depression population: Clues to genesis. *Geological Society of America Bulletin*, **93**, 1078-1086.
- LAMOREAUX P.E. & NEWTON J.G. (1986) - Catastrophic subsidence: An environmental hazard, Shelby County, Alabama. *Environ Geol Water Sci*, **8**, 25-40.
- LUCHA P., GUTIÉRREZ F. & GUERRERO J. (2003) - Subsidence hazards due to evaporite dissolution in the Cinca River valley (NE Spain). In: Beck, B.F. (Ed.). "Sinkholes and the engineering and environmental impact of karst". ASCE, special publication 122, 162-174.
- MALDONADO C., GUTIÉRREZ-SANTOLALLA F., GUTIÉRREZ-ELORZA M. & DESIR, G. (2000) - Distribución espacial, morfometría y actividad de la subsidencia por disolución de evaporitas en un campo de dolinas de colapso (Valle del Ebro, Zaragoza). *Cuaternario y Geomorfología*, **14**, 9-24.
- MARTÍNEZ J.D., JOHNSON K.S. & NEAL J.T. (1998) - Sinkholes in evaporite rocks. *American Scientist*, **86**, 38-51.
- McCALPIN J. (1996) (Ed.). *Paleoseismology*. Academic Press, San Diego, 583 p.
- MILANOVIC P. (2003) - Prevention and remediation in karst engineering. In: B.F. Beck (Ed.): "Sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst". ASCE, special publication 122, 3-28.
- PAUKSTYS B. (1996) - Hydrogeology and groundwater protection problems in karst region of Lithuania. *Geological Society of Lithuania*, **6**, 72 p.
- PAUKSTYS B., COOPER A.H. & ARUSTIENE, J. (1999) - Planning for gypsum geohazards in Lithuania and England. *Engineering Geology*, **52**, 93-103.
- PEARSON R (1999) - Geology and safety of dams case histories in gypsum karst for Horsetooth Dam and Reservoir and Carter Lake Dam No. 2, Colorado Big Thompson Project, Ft. Collins and Loveland, Colorado. U.S. Department of the Interior. Bureau of Reclamation. USBR Technical Service Center D-8321, Denver
- REMONDO J., GONZÁLEZ A., DÍAZ DE TERÁN J.R., CENDRERO A., FABBRI A. & CHUNG CH.F. (2003) - Validation of landslide susceptibility maps; examples and applications from a case study in Northern Spain. *Natural Hazards*, **30**, 437-449.

- RICHARDSON J.J. (2003) - Local land use regulation of karst in the United States. In: B.F. Beck (Ed.): "Sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst". ASCE, special publication 112, 492-501.
- SASTAGO C. (1796) - Descripción de los canales Imperial de Aragón y Real de Tauste. Ministerio de Fomento, Madrid, 174 p.
- SORIANO A. & SIMÓN J.L. (2002) - Subsidence rates and human damages in alluvial dolines of the Central Ebro Basin (NE Spain). *Environmental Geology*, **42**, 476-484.
- SOWERS G.F. (1996) - Building on sinkholes. ASCE Press. New York, 202 p.
- SWEETING M.M. (1972) - Karst landforms. Macmillan Press, 362 p.
- TAGIEDDIN S.A., ABDERAHMAN N.S. & ATALLAH M. (2000) - Sinkhole hazards along the eastern Dead Sea shoreline area, Jordan: a geological and geotechnical consideration. *Environmental Geology*, **39**, 1237-1253
- THARP T.M. (1999) - Mechanics of upward propagation of cover-collapse sinkholes. *Engineering Geology*, **52**, 23-33.
- TOLMACHEV, V., PIDYASHENKO S.E. & BALASHOVA T.A. (1999). The system of anti-karst protection on railways of Russia. In: B.F. BECK (Ed.): "Hydrogeology and engineering geology of sinkholes and karst", 423-429. A.A. Balkema, Rotterdam.
- TOULEMONT M. (1984) - Le karst gypseux du Lutétien supérieur de la région parisienne. Caractéristiques et impact sur le milieu urbain. *Revue de Géologie et de Géographie Physique*, **25**, 213-228.
- WARREN J. (1999) - Evaporites. Their evolution and economics. Blackwell. Oxford, 438 p.
- WILLIAMS P. (1972) - Morphometric analysis of polygonal karst in New Guinea. *Geological Society of American Bulletin*, **83**, 761-796

AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar su agradecimiento al ingeniero Octavio Plumed (ENTECSA) por la revisión del trabajo. Éste ha sido parcialmente subvencionado por el proyecto del Ministerio de Ciencia y Tecnología BTE2000-1149.