

# Aproximación pluridisciplinar en la localización y valoración de sectores de riesgo kárstico. Comparación de métodos de prospección geofísica y geomecánica en los alrededores de Zaragoza

*Multidisciplinary approach to the location and evaluation of karstic hazard zones. Application of geophysical survey and geo-mechanical prospecting in the surroundings of the Zaragoza*

Diego Ansón López, Óscar Pueyo Anchuela, Antonio Casas Sainz y Andrés Pocoví Juan

Grupo de Investigación Geotransfer. C/Pedro Cerbuna, nº12. CP. 50.009 Zaragoza. Universidad de Zaragoza. didacans@hotmail.com

## ABSTRACT

*The study of karst hazards from different methodologies is presented. The application of aerial photography studies, geotechnical approach and geophysical surveys show different results if they are considered in an independent way. The comparison between geophysics and aerial photography studies shows a good correlation whereas the detection of the main hazard zones can be ambiguous when only the geotechnical approach is considered. In the studied example, the higher dynamic strength of the materials occurs in the potentially most hazardous zones, because this parameter is related to the artificial filling of the subsiding zones. On the other hand, the integrated analysis from the three different points of view (aerial photographs, geotechnical and geophysical) permits: (i) the planning of the geotechnical survey in the anomalous zones and (ii) the lateral correlation of the obtained results from the isolated geotechnical tests.*

**Key words:** karst hazard, geophysics, GPR, EM survey, magnetometry.

*Geogaceta, 45 (2008), 87-90  
ISSN: 0213683X*

## Introducción

La problemática del riesgo kárstico en Zaragoza y sus alrededores es un tema de investigación de interés prioritario por parte de distintos grupos de investigación. Esta problemática ha sido afrontada desde distintos puntos de vista: estudios de fotografía aérea, aproximaciones geotécnicas, modelización analógica y prospección geofísica. Durante los últimos años, el trabajo realizado por el Grupo de Investigación Geotransfer de la Universidad de Zaragoza, ha desarrollado distintas metodologías para la aproximación a la problemática kárstica. Los modelos de evolución de karst aluvial en yesos en el sector de Zaragoza muestran procesos de disolución y lavado que afectan principalmente al substrato de los depósitos aluviales, constituido por los materiales evaporíticos de la Fm Zaragoza, depositada en el sistema endorreico Neógeno en el sector central de la Cuenca del Ebro (figura 1.a).

El estudio para la caracterización y valoración del riesgo kárstico por cada una de las metodologías planteadas de forma aislada presenta carencias y ambigüedades que pueden ser minimizadas desde una óptica pluridisciplinar. La caracterización geotécnica por sí sola parte de la extrapolación de los resultados obtenidos de manera puntual a grandes superficies, lo cual plantea un problema de equilibrio entre resolución requerida y viabilidad económica que en el caso de riesgo kárstico suele ser inalcanzable. El estudio de fotografía aérea, y más concretamente de fotografías históricas seriadas, permite una aproximación cualitativa, que ofrece información importante sobre la posibilidad de recurrencia de los colapsos. Sin embargo, esta técnica no deja de ser una aproximación parcial que puede permitir la focalización de los ensayos mecánicos pero donde algunos aspectos de alto riesgo kárstico pueden pasar desapercibidos (cuando no existen evidencias superficiales).

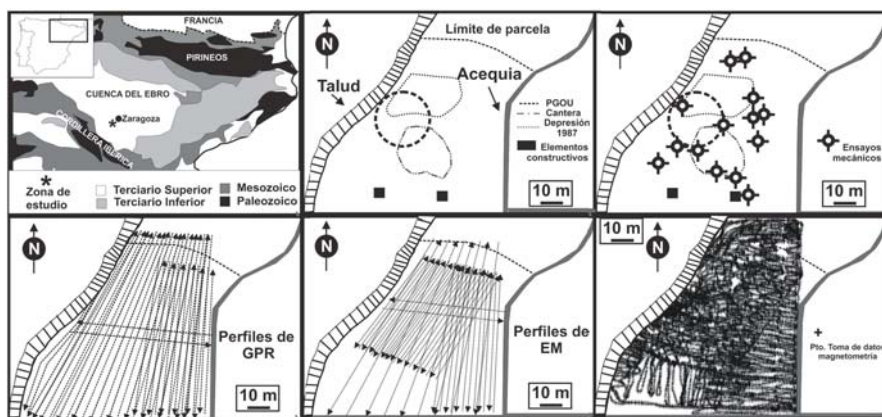
Aquí se presenta un trabajo desarrollado desde las aproximaciones geofísica,

geotécnica y del estudio de fotografía aérea. Estas aproximaciones se han realizado de forma independiente y no se han comparado los resultados hasta la finalización de la investigación sobre la misma parcela de estudio. La comparación de los resultados muestra, para este caso, que sólo la investigación conjunta es capaz de afrontar de forma fiable el dimensionamiento de los problemas kársticos, imprescindible para el diseño de cimentaciones en las áreas afectadas, pudiendo pasar inadvertidos defectos graves si los datos de alguna de ellas no se tienen en cuenta.

## Metodología

La metodología empleada ha consistido en el estudio de la fotografía aérea reciente de la zona, cartografías topográficas antiguas, prospección geofísica y ensayos de resistencia mecánica.

Los equipos utilizados han sido un magnetómetro de protones de efecto Overhauser (Gem systems) apoyado por



**Fig. 1.- (a) Localización de la zona de estudio. (b) Resultados del estudio de fotografía aérea (PGOU: dolina identificada en el Plan General de Ordenación Urbana de la ciudad de Zaragoza). (c) Localización de ensayos mecánicos. (d) Localización de perfiles de georradar realizados. (e) Localización de perfiles EM. (f) Mallado de puntos de magnetometría realizados.**

*Fig. 1.- (a) Location of the studied area. (b) Results from analysis of aerial photography (PGOU: doline identified in the Plan General de Ordenación Urbana de la ciudad de Zaragoza). (c) Location of the mechanical tests. (d) GPR profiles localization. (e) Position of EM profiles. (f) Grid for the geomagnetic survey.*

un magnetómetro de precesión de protones (estación base durante el estudio), un equipo de georradar con antenas apantalladas de 100 MHz de frecuencia central (RAMAC) y un equipo de radiación electromagnética multifrecuencia (GEM-2, Geophex). En cuanto a los ensayos mecánicos, se han realizado 11 ensayos de penetración dinámica hasta rechazo (número de golpes de 100 y con una penetración menor de 20 cm) y 4 sondeos mecánicos hasta la identificación del substrato rocoso correspondiente al Mioceno inferior situado bajo la cubierta aluvial.

El procesado de los datos de la prospección por georradar, una vez obtenidos los perfiles, y aplicados los tratamientos de amplificación de la señal con la profundidad, suavizado (stacking) y filtro de frecuencias fuera de rango, ha consistido en elaboración de cartografía de sectores, mapas de correlación de sectores, mapas de correlación matemática de amplitudes de onda y mapas residuales de anomalías, que ya se han aplicado y descrito en otros trabajos de nuestro grupo de investigación (Pueyo Anchuela *et al.*, 2007, 2008). El muestreo se ha realizado trazando una cuadrícula sobre el solar para la realización de perfiles paralelos y equidistantes (EM y GPR; figura 1) y efectuando un barrido denso de la totalidad del solar (magnetometría).

A partir de los datos de la prospección EM se ha realizado el cálculo de la susceptibilidad aparente y conductividad aparente y mapas de correlación lateral entre perfiles. El análisis de estos datos se ha centrado en las frecuencias de mayor rango, que representan menores profun-

didades (frecuencia de 63025 Hz: 1-4 metros y 18325Hz: 3-7 metros). En los datos de magnetometría se ha realizado la corrección de la variación diurna a partir del equipo estático, no habiéndose identificado la presencia de tormentas magnéticas durante la prospección. Se han realizado mapas de anomalías relativas a partir del establecimiento de un datum local de intensidad de campo magnético (las anomalías de mayor intensidad se han excluido de los gráficos puesto que se encuentran relacionadas con elementos metálicos identificados durante la prospección).

**Resultados obtenidos**

*Ensayos mecánicos.* La testificación de los sondeos mecánicos y su correlación con los ensayos de penetración dinámica permiten identificar 3 niveles, con comportamiento y características diferentes. Un nivel superficial que puede extenderse hasta una profundidad de 4.8 metros de profundidad, caracterizado por rellenos antrópicos, con mayores espesores en el sector meridional de la parcela y con variaciones progresivas de cota a lo largo de la totalidad de la cuadrícula prospectada. Los golpes en esta unidad son variables, con mayores valores en el sector noroccidental de la cuadrícula. La segunda de las unidades identificada, con espesores comprendidos entre 1.2 y 6.8 metros y con mayor espesor en el sector septentrional, puede interpretarse como depósitos cuaternarios aluviales. Por debajo de esta unidad y hasta la profundidad máxima alcanzada se identifica el substrato mioceno compuesto por una

unidad superior de naturaleza cohesiva, bajos golpes y que muestra variaciones de espesor y mayor cota de aparición hacia el sector norte y oeste de la cuadrícula y una alternancia de niveles yesíferos con margas y arcillas que aparece a profundidades comprendidas entre los 11 y 24 metros.

En una transversal este-oeste se observa que la cota del substrato mioceno es constante (prácticamente horizontal) y donde se producen variaciones laterales de las unidades superiores (unidad 2 y nivel cohesivo del substrato que puede interpretarse como substrato alterado). En una transversal N-S los mayores cambios se producen en la posición del substrato y variaciones de los espesores de las unidades superiores, con mayor desarrollo en potencia y número de cuerpos fluviales en el sector septentrional.

Todos los datos obtenidos de los ensayos geotécnicos son compatibles con una disposición irregular del substrato y una acomodación posterior de los rellenos cuaternarios adaptándose a una geometría de paleorrelieve. Por otro lado, la geometría de los contactos basales de las distintas unidades muestra pendientes suaves y cambios progresivos de espesor.

*Magnetometría*

Desde el punto de vista de las anomalías magnéticas, la comparación entre sectores permite identificar dos zonas con comportamiento diferencial. El sector 1, localizado en la zona noroccidental muestra un valor menor de intensidad de campo magnético con envolvente semicerrada en la superficie de prospección y valores de 20 nT por debajo de la media de la zona de prospección (figura 2). En el sector centro meridional de la cuadrícula se identifica una zona de anomalía positiva, con valores de hasta 90 nT por encima del datum local y agrupado en dos dipolos con cambios según una orientación N-S de signo negativo-positivo con mayor desarrollo del polo positivo (compatible con materiales de mayor susceptibilidad media).

*Prospección electromagnética*

La correlación lateral entre perfiles paralelos a lo largo de la cuadrícula de prospección de la susceptibilidad y conductividad aparentes muestran un sector central de la cuadrícula con una orientación NW-SE de menor conductividad aparente con dos valores mínimos en el sector noroccidental de la cuadrícula y sector central de la parcela. Las variaciones de la pendiente son progresivas a lo largo de la cuadrícula y sólo se identifi-

can variaciones significativas en el caso de las frecuencias compatibles con menores profundidades (mayores frecuencias de muestreo). Las variaciones de la intensidad en fase de la onda EM son menores, al igual que la susceptibilidad aparente calculada para las frecuencias más altas.

**Georradar**

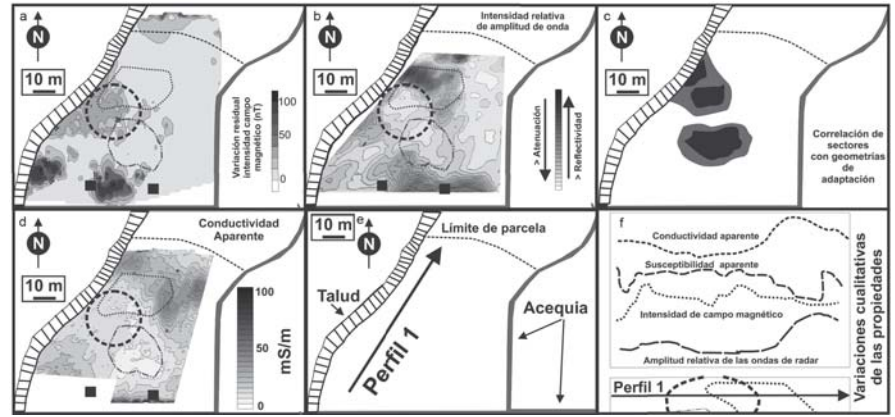
Desde el punto de vista geométrico, las mayores variaciones estructurales de los reflectores se producen en el sector noroccidental de la cuadrícula. Estas variaciones muestran geometrías de adaptación y/o asentamiento con proyección en planta de envolvente semicerrada y disposición centrípeta. Los mapas de correlación de amplitudes de onda muestran una envolvente semicerrada de cambios laterales identificados por polos pareados positivo-negativo con mínimo relativo incluido en la envolvente local. Las características del sector compartimentado son compatibles con mayores valores de penetración potencial, mayores valores de reflectividad y menores atenuaciones de las ondas.

En el sector central de la cuadrícula se identifica un límite lateral neto de geometría curvada y concavidad hacia el S. Las características de la zona compartimentada por estas geometrías muestran variaciones relativas laterales menores respecto al medio circundante.

**Discusión**

El estudio de las fotografías aéreas de principios de los años 80 muestra una zona deprimida que promovió su cartografía en el PGOU de la ciudad de Zaragoza como asociada a una zona de riesgo kárstico potencial. La práctica habitual de allanado de las parcelas, tanto durante las actuaciones agrícolas como con posterioridad, dio lugar a que en el momento de la realización de la prospección geofísica y geomecánica no existieran evidencias superficiales del sector de riesgo kárstico mencionado.

El análisis de los ensayos mecánicos realizados muestra una curiosa contradicción en su comparación con los resultados obtenidos de la fotografía aérea: en aquellos sectores relacionables con la zona de subsidencia la resistencia dinámica de los materiales muestra mayores valores y menores profundidades de rechazo (figura 3). Es decir, que aquellos sectores de mayor riesgo potencial muestran menores evidencias geotécnicas de riesgo kárstico. Esta situación se produce, como se indicaba anteriormente, por



**Fig. 2.- Principales resultados obtenidos de la prospección geofísica: (a) Magnetometría. (b) Intensidad relativa de las ondas de radar. (c) Correlación de sectores estructurales. (d) Cálculo de la conductividad aparente a partir de los datos de radiación EM (frecuencia 18325 Hz). (e) Localización del perfil detallado en la figura (f).**

*Fig. 2.- Main results obtained from the geophysical survey: (a) Magnetometry. (b) Amplitude grid maps. (c) Lateral correlation of structural sectors. (d) Apparent conductivity obtained from the EM survey (frequency 18325 Hz). (e) Location of detailed profile showed in (f).*

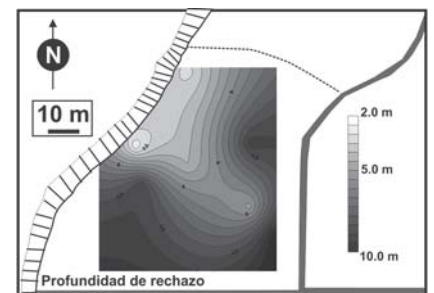
la habitual práctica de relleno y homogeneización superficial de las parcelas. De esta forma, aquellos sectores que mayores resistencias estáticas ofrecen se correlacionan con la naturaleza de los materiales utilizados para el relleno, en este caso materiales principalmente granulares, mientras que el terreno natural ofrece menores valores de la capacidad portante de los materiales.

El análisis comparado de los resultados de prospección geofísica y de fotografía aérea (figura 4), muestra menores valores de la intensidad del campo magnético que responde como un volumen de materiales de menor susceptibilidad relativa y que dibuja, a grandes rasgos, el contorno de la dolina identificada en las fotografías de los años 80. Este sector se encuentra asociado con una menor conductividad aparente de los materiales (disminución de la intensidad de la onda en cuadratura) y ligera disminución de la susceptibilidad aparente de los materiales. Por otro lado, los perfiles de radar muestran geometrías de adaptación asociadas a las zonas de cambio de propiedades mencionadas, y que muestran una proyección superficial de geometrías de envolvente semicerrada, y abierta hacia el sector noroccidental de la parcela.

En el sector centro-meridional de la cuadrícula se identifican varias anomalías magnéticas dipolares amplias y de escaso desarrollo lateral. Este tipo de anomalías se relaciona con elementos de mayor susceptibilidad magnética que el entorno y se encuentran asociadas a cambios laterales importantes de la amplitud de onda de GPR (mayor profundidad potencial y elementos más reflectivos) y valores mayores de la conductividad aparente de los

materiales. La comparación con las fotografías aéreas muestra una correlación de estos sectores con elementos constructivos asociados a una pequeña cantera de grava que existía en el sector. Sin embargo, el desarrollo superficial de las anomalías identificadas muestra un mayor rango de afección que dichas estructuras. En la exploración superficial de esta zona se han identificado, en algunas ocasiones, restos constructivos (baldosas, hormigón, ladrillos) que se concentran a lo largo de este sector. La amplitud de las anomalías de magnetometría es compatible con elementos de alta contribución ferromagnética a la susceptibilidad, compatible con elementos antrópicos, y el mayor desarrollo superficial de las anomalías podría relacionarse con los restos de las edificaciones que existían en este sector.

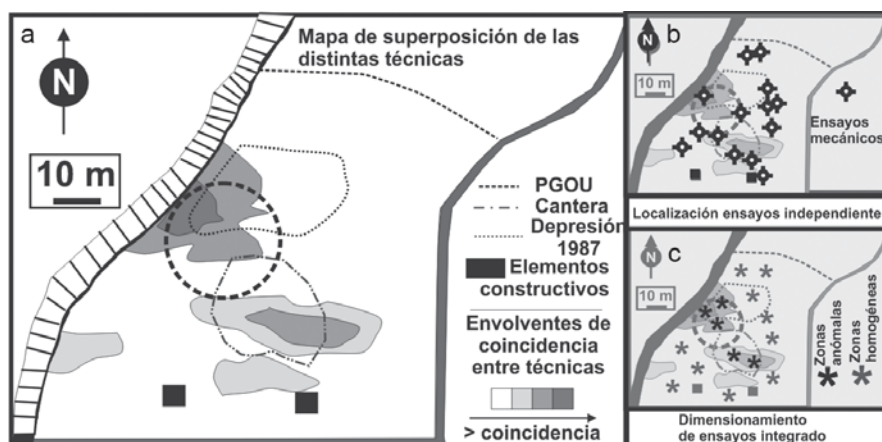
En la zona central de la cuadrícula se observa, en los perfiles de EM y de GPR, un sector de características anómalas menores y que principalmente se identifica



**Fig. 3.- Modelo superficial de la cota de rechazo obtenido de los ensayos mecánicos de penetración dinámica.**

*Fig. 3.- Model of differential strength of the materials against the dynamic penetration.*





**Fig. 4.-** (a) Mapa de superposición de los radios de anomalías identificados por las técnicas geofísicas y resultados obtenidos de los estudios de fotografía aérea. (b) localización de los ensayos mecánicos posicionados sin tener en cuenta los datos de la aproximación geofísica y de fotografía aérea, (c) posible localización de ensayos de haberse tenido en cuenta los resultados obtenidos de la prospección geofísica y el estudio de fotografía aérea. Se ha considerado el mismo número de ensayos a realizar contemplando la comparación entre los resultados obtenidos en zonas anómalas y terreno natural.

*Fig. 4.-* (a) Map of the anomalous zones obtained from the different geophysical techniques and results obtained from the aerial photography analysis. (b) Location of the mechanical tests before geophysical surveys and aerial photography approaches. (c) Location of the mechanical tests after the analysis of the results obtained from the geophysics and the aerial photography analysis. The same number of tests has been considered to appraise the differences between the anomalous zones and the undisturbed soil.

en los mapas de amplitudes y que representa alteraciones compatibles con cambios laterales netos de las propiedades EM del subsuelo. Estas anomalías se correlacionan con los límites laterales de una antigua cantera superficial de grava que se identifica en algunas de las fotografías aéreas. Las propiedades geofísicas consideradas muestran bajas variaciones laterales entre el terreno natural y este sector. Estos aspectos muestran un comportamiento similar de los materiales dentro y fuera de este sector y sólo identificado en cambios estructurales netos en los perfiles y en los mapas de amplitudes de onda.

El análisis comparado de los resultados obtenidos muestra una buena correlación entre los elementos identificados en las fotografías aéreas y las anomalías geofísicas. Por el contrario, las variaciones geotécnicas determinadas con los ensayos mecánicos difícilmente pueden adscribirse a los resultados obtenidos de la fotografía aérea y de la prospección geofísica si no se hace un análisis comparado de las técnicas utilizadas. En el caso de cimentaciones superficiales, los resultados de capacidad portante de los materiales superficiales estarían mostrando valores significativamente mayores que los esperados para el terreno natural en los sectores de mayor riesgo kárstico, mientras que pasa inadvertida la problemática en profundidad que ha provocado

una zona de subsidencia o asentamiento progresivo identificado por el volumen de materiales de aporte utilizado para la homogeneización superficial de los materiales en este sector.

### Conclusiones

El análisis integrado de ensayos mecánicos, fotografía aérea y prospección geofísica ha permitido la caracterización de los materiales, de su estructura y de los cambios laterales de estos en profundidad. En este caso, el alto número de fotografías aéreas existente (12) ha permitido un análisis progresivo de la evolución de la parcela de estudio entre los años 1970 y 2006. Sin embargo, esta aproximación en algunos casos no es posible elaborarla con tanto detalle cuando no existe un volumen de datos como el presentado. Los ensayos mecánicos localizados sin tener en cuenta los datos de las otras dos metodologías, pueden dar lugar a interpretaciones de aparentes comportamientos homogéneos de los materiales del subsuelo e incluso obtener resultados ambiguos o contrarios a los esperables para el sector analizado.

Con independencia de la posibilidad de adscripción de las anomalías geofísicas a elementos conocidos o riesgos potenciales, que en este caso es satisfactoria y directa, la prospección geofísica puede ofrecer una mejor

aproximación en el momento de la planificación de los ensayos mecánicos. Los cambios de propiedades eléctricas y magnéticas obtenidos mediante distintas técnicas muestran una correlación directa, por lo que pueden correlacionarse con otras propiedades físicas como puede ser la capacidad portante de los materiales, objetivo de cualquier estudio geotécnico del terreno. Una vez identificados los cambios geotécnicos de los materiales, la extensión lateral de la zona de cambio de propiedades puede realizarse de forma directa a partir de las técnicas geofísicas, permitiendo la correlación lateral entre ensayos mecánicos puntuales.

La delimitación y caracterización de la problemática geotécnica del riesgo kárstico, donde los estudios geológicos deben enfrentarse a distintas limitaciones y ambigüedades, puede mejorarse significativamente a través de enfoques multidisciplinares, y la aplicación sistemática de distintas técnicas geofísicas con anterioridad a los ensayos mecánicos. La aplicación de estas metodologías de forma conjunta no sólo permite la delimitación estructural de los cambios del subsuelo, sino que la aplicación del conocimiento de las variaciones laterales de las propiedades del subsuelo es una herramienta útil a considerar en el momento de la localización de los ensayos.

### Agradecimientos

Este trabajo forma parte de los objetivos de desarrollo metodológico y aplicación de riesgos kársticos del Grupo de Investigación GeoTransfer de la Universidad de Zaragoza. Los autores quieren agradecer a Arturo Blécula Lázaro y al resto de la sección de Geotecnia de la empresa ARCOTECNOS S.A. por el apoyo y colaboraciones a lo largo del desarrollo de este trabajo.

### Referencias

- Casas, A.M., Mochales, T., Pueyo Morer, E. L., Soriano, M.A., Pueyo Anchuela, O., Pocolí Juan, A. (2006). *Cartografía Geológica Aplicada a Áreas Urbanas*. Lisboa. 121-134.
- Ayuntamiento de Zaragoza (2003): *Plan General de Ordenación Urbana de la Ciudad de Zaragoza*.
- Pueyo Anchuela, O., Casas Sainz, A., Pocolí Juan, A., 2008. EGU2008-A-07453.
- Pueyo Anchuela, Ó., Casas Sainz, A., Pocolí Juan, A., Jiménez, M.A., Mochales, T. 2007. EGU2007-A-08911.