

# Propuesta de integración de análisis de patologías constructivas con prospección geofísica por georradar

## *Proposal of integrated analysis of constructive pathologies and geophysical survey by means of ground penetrating radar*

Oscar Pueyo Anchuela<sup>1</sup>, Andrés Pocoví Juan<sup>1</sup>, Juan Ignacio Bartolomé<sup>2</sup>, Antonio M. Casas Sainz<sup>1</sup>, Carlos Revuelto<sup>2</sup> y Gloria Galindo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Investigación Geotransfer. Universidad de Zaragoza. C/ Pedro Cerbuna 12 50009, Zaragoza, España. opueyo@gmail.com, apocovi@unizar.es, acasas@unizar.es

<sup>2</sup> GEOSCAN Consultoría Geológica S.L.L. C/ Ajedrea nº 20 nave E-24. Parque Empresarial Magnus (Polígono Empresarium). 50720 Zaragoza, España.

jibartolome@geoscan.es, crevuelto@geoscan.es, ggalindo@geoscan.es

### ABSTRACT

*Subsidence processes commonly imply volume reduction of an underground unit. This reduction can be due to constructive imperfections, filling consolidation, evaporitic solution or collapses of silty units. In many cases, the surficial evidences -pathologies- allow the identification of their origin even though they are contingent on the material rheology. The geometrical characterization of underground materials by means of Ground Penetrating Radar (GPR), is presented as a successful methodology for the actual determination of active processes radii, the identification of the origin depth and the indirect mapping of unstable areas at urban areas.*

**Key-words:** Pathologies, subsidence, GPR.

### RESUMEN

*El análisis de los procesos de subsidencia representa la reducción de volumen de una unidad en el subsuelo. Esta reducción puede deberse a imperfecciones constructivas, consolidación de rellenos, disolución de evaporitas o el colapso de materiales limosos. En muchos casos, las evidencias superficiales, patologías, pueden permitir la caracterización del origen, pero éstas son dependientes de la reología de los materiales. La caracterización geométrica del subsuelo por medio de georradar, se presenta como metodología eficaz para identificar el radio real de los procesos activos, la identificación de la cota de afección y la cartografía indirecta de medios inestables en medios urbanos.*

**Palabras clave:** Patologías, subsidencia, georradar.

Geogaceta, 55 (2014), 71-74.  
ISSN (versión impresa): 0213-683X  
ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 24 de junio de 2013  
Fecha de revisión: 22 de octubre de 2013  
Fecha de aceptación: 29 de noviembre de 2013

## Introducción

El desarrollo de evidencias superficiales de subsidencia (movimiento vertical del terreno) puede ser el resultado de procesos debidos tanto a la fábrica constructiva, las características de compactación de los materiales en el subsuelo (consolidación y asentamiento) o a las características intrínsecas de los materiales del subsuelo (solubilidad, colapsabilidad o hinchamiento).

En ocasiones, la aproximación al estudio se realiza a través de la identificación de deformaciones o daños estructurales (patologías) afectando a medios constructivos. Este análisis se centra en la identificación del sentido de hundimiento, apertura de grietas, reconstrucción de la deformación y su distribución areal. El análisis areal se

realiza con el objetivo de delimitar la presencia de focos de subsidencia. Sin embargo, dadas las características de los materiales constructivos, las evidencias de subsidencia se identifican habitualmente a través de indicadores frágiles y cuyo desarrollo puede seguir anisotropías constructivas o depender de la reología del material. En estos casos puede existir la deslocalización de las evidencias superficiales con respecto su foco en profundidad. Estos análisis se centran únicamente en aquellos procesos con afección superficial, quedando fuera aquellos con desarrollo incipiente o sin permitir una evaluación completa del origen de dichos procesos.

El análisis directo por medio de ensayos en medios urbanizados puede estar limitado por las propias construcciones y donde

el estudio invasivo sistemático pueda no ser abordable con la requerida densidad. En este sentido, también es importante conocer la representatividad de los ensayos puntuales realizados para identificar la problemática constructiva de forma integrada.

En este trabajo se presenta una metodología que puede satisfacer el análisis en estos contextos a través del análisis cinemático de patologías, su distribución en planta y prospección geofísica por georradar. El objetivo es determinar si existe relación entre los cambios estructurales de los materiales del subsuelo y el desarrollo de patologías de forma puntual y areal, la profundidad del fenómeno, el origen de las patologías y las características de los materiales en el subsuelo responsables de la subsidencia.

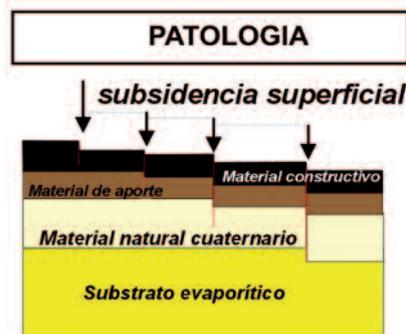
**Contexto de estudio**

El estudio presentado en este trabajo se basa en datos obtenidos a lo largo del sector central de la Cuenca del Ebro y el entorno de la ciudad de Zaragoza. En esta zona, la subsidencia puede relacionarse tanto con procesos naturales, antrópicos o combinación de ambos (Fig. 1). En el caso de los procesos naturales intervienen i) un medio soluble en el subsuelo asociado al substrato mioceno de la Fm. Zaragoza (Quirantes, 1978); ii) abanicos aluviales al S de los escarpes terciarios de la Cuenca del Ebro, caracterizados principalmente por la presencia de limos yesíferos colapsables (Soriano, 1990) y iii) arcillas hinchables afectando a la unidades meteorizadas de algunas de las unidades terciarias de la Cuenca del Ebro (Ayala *et al.*, 1986). Estos factores se unen a los de origen antrópico asociados a la presencia de materiales de aporte de baja compactación o la utilización de materiales de origen natural en los que pueden existir procesos de subsidencia, asentamiento, colapso o hinchamiento.

Estos factores tienen una relación directa con la unidad que sufre una reducción de volumen (responsable de los procesos de subsidencia) y que puede caracterizarse por la posición de dicha unidad con respecto a la superficie de estudio (Fig. 1). En este caso, la identificación de la cota de las unidades afectadas por dichos procesos puede permitir identificar su origen. En función del contexto geológico local, los radios de afección superficial y la unidad identificada como responsable de los procesos de subsidencia puede determinarse un origen relacionado con los materiales constructivos o naturales y asociados a asentamiento, consolidación o colapso propagado de condiciones más profundas. En estos casos, la determinación de la cota de origen de la unidad que presenta una reducción de volumen puede permitir delimitar su origen, valorar los tipos de ensayos a realizar, ponderar su significado lateral y delimitar los factores condicionantes del desarrollo de patologías en este momento o los medios susceptibles de desarrollarlas en el futuro.

**Metodología**

El análisis cinemático supone la interpretación del movimiento de apertura de las



**Fig. 1.- Modelo conceptual del origen de procesos de subsidencia superficial dependiendo de la unidad que sufre una reducción de volumen y su afección superficial.**

*Fig. 1.- Conceptual model about the origin of subsidence surficial processes depending the unit that present a volume reduction in the sub-soil.*

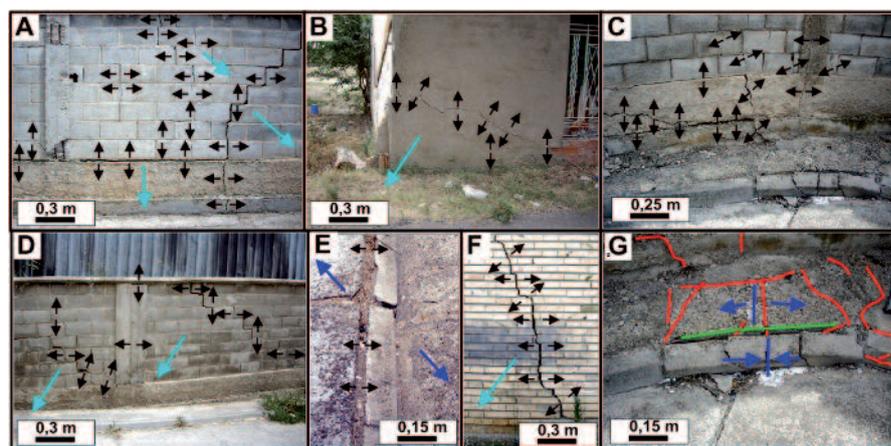
grietas o fracturas y la determinación de la envolvente general de todos los movimientos locales identificados (Fig. 2). Las anisotropías o elementos constructivos pueden controlar la distribución de las patologías o desarrollar disarmonías entre niveles. En estos casos, se pueden producir estructuras compresivas locales debidas a movimientos generales de hundimiento (Fig. 2G). El estudio de las patologías y su distribución en planta se ha completado con los resultados obtenidos de la prospección geofísica por georradar con perfiles localizados directamente en sus proximidades. El estudio geofísico se ha realizado con equipos de geo-

radar dada la posibilidad de realizar perfiles de forma sistemática y con una baja im- pronta de los ruidos en medios urbanos. La prospección se ha realizado con distintas antenas (100 y 250 MHz). El uso de antenas de alta frecuencia permite analizar con una alta sensibilidad las deformaciones que afectan a los materiales constructivos más superficiales, mientras que para el análisis de las características de los materiales naturales se han utilizado equipos de menor frecuencia.

El procesado de los datos geofísicos se ha realizado a través del filtro de frecuencias fuera de rango, amplificación de la señal con la profundidad, filtrado del carácter sinusoidal de las ondas del radar y corrección de la velocidad de propagación de las ondas en el subsuelo a través del ajuste de hipérbolas de difracción. En el caso de la corrección de los tiempos de propagación con la profundidad, ésta se ha realizado con el objetivo de determinar la localización de reflectores en el subsuelo, aunque no ha sido el objetivo obtener una localización exacta de la profundidad durante la caracterización geométrica de los materiales analizados.

**Ejemplos de estructuras de subsidencia**

El análisis de los perfiles de georradar permite la identificación combinada de la geometría del terreno y de los cambios de



**Fig. 2.- Ejemplos de patologías y análisis cinemático de movimiento con distintos grados de complejidad siguiendo anisotropías constructivas (A, B, C, D). (E) Basculamiento y rotación de elementos constructivos, (F) ejemplo de análisis de movimiento local a lo largo de una fractura y envolvente general de movimiento, (G) detalle de (C) en el que se identifica el desarrollo de estructuras compresionales asociadas a un hundimiento general y despegue de los elementos constructivos.**

*Fig. 2.- Examples of pathologies and kinematic analysis depending the construction anisotropies (A,B,C,D). (E) Tilting and block rotation of constructive elements, (F) movement analysis at the fracture scale and main movement trend, (F) detail from (C) where shortening structures appears at a general subsidence process due to the detachment of constructive elements.*

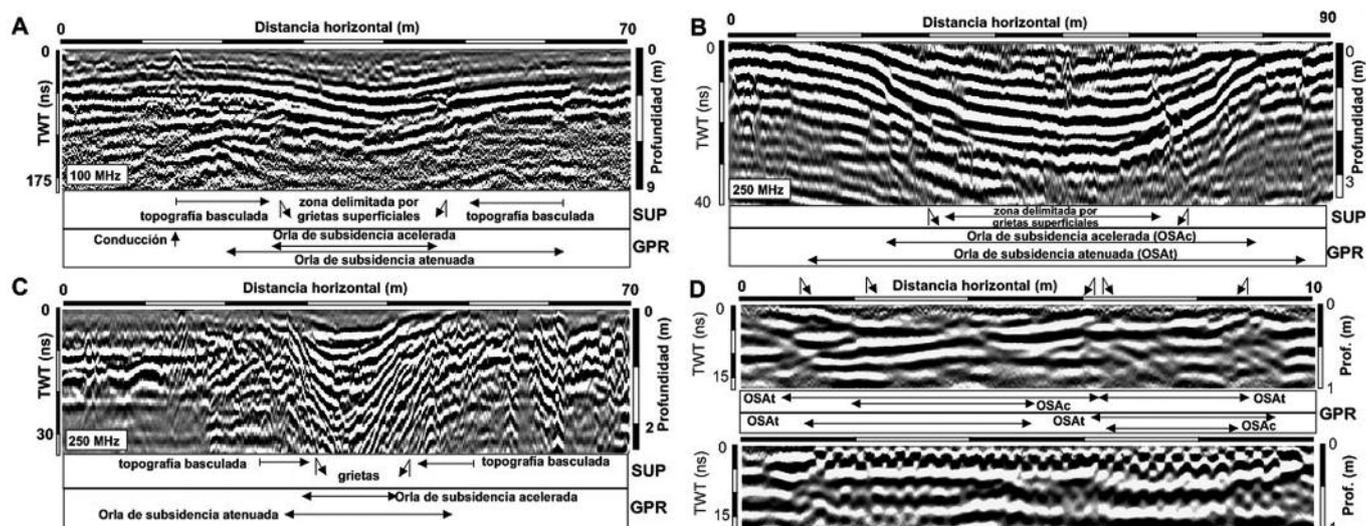


Fig. 3.- Ejemplos de perfiles de georradar en sectores con patologías o procesos de subsidencia superficial (A y B) Zonas de subsidencia superficial afectando a la topografía con procesos de reparaciones progresivas; (C) morfología de colapso en un sector con procesos actuales de subsidencia superficial; (D) Análisis comparado de dos perfiles de georradar paralelos en los que se identifica un proceso de subsidencia superficial asociado a patologías superficiales y combamiento topográfico. Debajo se incluye un perfil paralelo en el que se no se identifican cambios superficiales pero donde la misma estructura de hundimiento por debajo del material constructivo puede observarse (nótese la alta densidad de anomalías en el perfil inferior interpretadas como huecos entre la solera superficial y el terreno natural). TWT (two way travel), SUP: evidencias superficiales; GPR (evidencias identificadas en los perfiles de georradar), OS (orla subsidente; Ac acelerada; At atenuada).

Fig. 3.-Examples of GPR sections in sectors with pathologies or surficial subsidence processes. (A and B) Surficial subsidence zones affecting to the topography and where usual reparations are carried out; (C) collapse geometry in a GPR-section in a sector where surficial subsidence processes are identified in this moment; (D) compared analysis of two parallel GPR profiles where a surficial subsident process is identified through surficial pathologies and topographical bending, and a parallel profile where no surficial evidences are identified but where the same sinking process, below the construction material, can be identified (note the high density of anomalies in the lower profile that are interpreted as cavities related to the natural materials detachment). TWT (two way travel), SUP: surficial evidences; GPR: subsident evidences identified in the GPR profiles; OS (sinking or subsident zone; Ac accelerated; At attenuated).

las propiedades electromagnéticas de los materiales del subsuelo. La variación de la propagación de las ondas puede producir un desfase vertical en el registro, produciendo cambios aparentes de la geometría del terreno que pueden maximizar o minimizar los cambios geométricos. Sin embargo, tanto en el caso de cambios geométricos y de las propiedades, la variación estructural identificada en los perfiles es un indicador del cambio de los materiales por debajo de la superficie de estudio y permite identificar la presencia de una variación no homogénea de las características del subsuelo.

Los cambios geométricos y de continuidad de los reflectores pueden permitir describir el origen del proceso, además de la definición de la cota de origen de dichos cambios. En el caso de los ejemplos recogidos en la figura 3, se incluye un grupo de perfiles realizados sobre sectores con procesos activos conocidos y que han servido como modelización directa de los resultados potenciales.

Los dos primeros casos analizados en la figura 3 corresponden a sectores en los que se conoce la presencia de procesos conti-

nuados de subsidencia superficial y en los que se realizan reparaciones periódicas con materiales asfálticos, lo cual contribuye a ocultar las evidencias superficiales.

En ambos casos, se identifica un combamiento que progresa hasta profundidades de 6 m (Fig. 3A) o 3 m (Fig. 3B), con cambios progresivos y donde se puede definir una zona interna donde los reflectores dibujan una geometría en sección planocóncava con buzamientos medios-altos y otra geometría con una envolvente más desarrollada y con menores buzamientos (orlas de subsidencia acelerada y atenuada).

En otros casos, las evidencias superficiales puede mostrar aspectos similares de combamiento topográfico, subsidencia y reparaciones, pero el análisis de los perfiles de georradar no muestra continuidad lateral de todos los reflectores (Fig. 3C). La geometría superficial muestra una morfología similar a la de los casos anteriores, con una sección planocóncava. Sin embargo, en condiciones más profundas, los reflectores se verticalizan y pierden continuidad lateral. Este dispositivo mostraría un proceso en profundidad de tipo co-

lapso, aunque en la actualidad las evidencias superficiales sólo muestran subsidencia.

En la figura 3D, para dos perfiles paralelos, se puede identificar la presencia de procesos de subsidencia por debajo del nivel constructivo superficial o ausencia de afección subsuperficial y cambios geométricos similares en el subsuelo por debajo del nivel constructivo. Por otro lado, en este caso, se identifican gran cantidad de anomalías de pequeño desarrollo, próximas a la superficie y asociadas con un proceso de despegue entre el nivel constructivo y el terreno natural inferior.

### Discusión: análisis integrado de patologías y perfiles de georradar

La presencia de secciones planocóncavas en la estructura natural del terreno no implica necesariamente un origen asociado a procesos de hundimiento o subsidencia. Gil-Garbí *et al.* (2012) analizan la presencia de secciones planocóncavas asociadas tanto a medios de subsidencia kárstica como a la propia estructura sedimentaria.

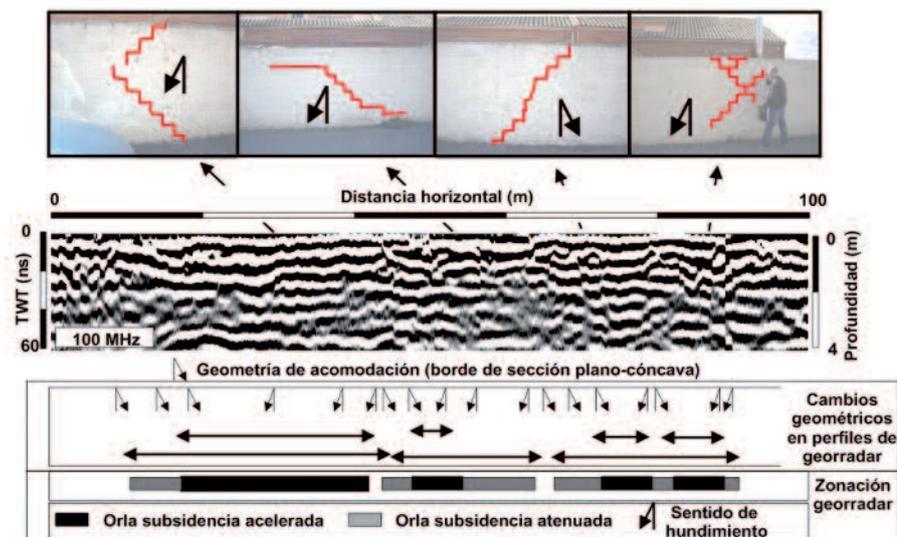


Fig. 4.- Ejemplo aplicado de estudio integrado de patologías y cambios geométricos en perfiles de georradar. Se ha realizado el análisis cinemático de patologías sobre las fotografías, la caracterización geométrica de los cambios identificados en los perfiles de georradar, el análisis comparado de las patologías con los elementos estructurales del subsuelo y la zonación integrada.

Fig. 4.- Applied example of integrated analysis of pathologies and geometrical changes in the GPR sections. The kinematic pathology interpretation, the geometrical GPR characterization, the compared analysis and the correlation between pathologies and structural changes has permitted the development of an integrated analysis.

En los casos asociados a patologías, la identificación de una sección planocóncava en el terreno supone o bien un proceso de subsidencia superficial por reducción de volumen de la unidad inferior o la respuesta a un proceso más profundo de hundimiento progresivo. Con independencia del origen de la estructura del terreno inferior, la presencia de patologías asociadas a las variaciones geométricas del terreno permite definir la extensión lateral y vertical del origen de dichos procesos. En la figura 4 se presenta el resultado de un análisis integrado con el objetivo de determinar el origen de las patologías y la delimitación de los sectores susceptibles de desarrollarlas. Las patologías muestran movimientos principales de componente vertical que se correlacionan con cambios geométricos de igual sentido en los reflectores identificados en los perfiles de georradar. En todos los casos, la identificación de patologías superficiales está asociada con un cambio geométrico en el terreno. Dichos cambios pueden extenderse más que los identificados en superficie o desarrollar secciones simétricas de acomoda-

daciones que no tienen respuesta superficial en este momento.

Este análisis permite realizar una valoración integrada de zonación en función de la prospección por georradar y correlacionar sectores con patologías con su origen en profundidad. Esta zonación permite explicar el origen de patologías pero también la identificación de sectores potenciales inestables aunque no presenten evidencias superficiales. El análisis de la cota de afectación de los procesos muestra un desarrollo que se prolonga hasta los 2,5-3,0 metros de profundidad. Por debajo de esta cota, se identifican reflectores subhorizontales o cambios independientes del buzamiento de los reflectores superficiales. En este caso, además de la zonación de medios inestables, se puede relacionar el origen de la subsidencia superficial con una reducción de volumen de la unidad localizada por encima de los 3 metros. Esta relación con la cota de los reflectores afectados permite, siguiendo el modelo de la figura 1 evaluar el potencial origen de las patologías y dimensionar el desarrollo de ensayos invasivos.

## Conclusiones

Los resultados presentados ilustran la utilidad del análisis cinemático de patologías integrado con el análisis de perfiles de georradar. Estos resultados muestran las posibilidades de utilización de metodologías integradas para el análisis de la extensión real de los procesos de subsidencia con independencia de las evidencias superficiales y el establecimiento de la cota de afectación como indicador de la unidad que sufre la reducción de volumen desencadenante de la subsidencia superficial. La metodología integrada planteada puede ser de interés para su aplicación sistemática en medio urbanos para caracterizar patologías constructivas, establecer los radios de afectación lateral, dimensionar ensayos en la zona pero también analizar la representatividad de dichos ensayos de forma integrada con los datos geofísicos.

## Agradecimientos

Este trabajo forma parte de los objetivos del grupo de Investigación consolidado "Geotransfer" de la Universidad de Zaragoza (financiado por el Gobierno de Aragón y fondos FEDER) y de los convenios de investigación suscritos entre la Universidad de Zaragoza-OTRI y GEOSCAN S.L.L. Los autores quieren agradecer los comentarios y sugerencias de Carlos Liesa, J.J. Durán Balsero y un revisor anónimo cuyo trabajo ha mejorado el manuscrito original.

## Referencias

- Ayala, F.J., Ferrer, M., Oteo, C. y Salinas, J.L. (1986). *Mapa predictor de riesgos por expansión de arcillas en España a escala 1:1.000.000*. IGME-Cedex. Madrid. 64p.
- Gil-Garbí, H., Pueyo Anchueta, Ó., Luzón, A., Pocoví Juan, A., Casas Sainz, A. y Pérez, A. (2012). *Geo-Temas* 13, 317-320
- Quirantes, J. (1978). *Estudio sedimentológico y estratigráfico del Terciario Continental de Los Monegros*. Institución Fernando el Católico. Zaragoza. 208 p.
- Soriano, M.A. (1990). *Geomorfología del sector centromeridional de la Depresión del Ebro*. Institución Fernando el Católico. Zaragoza. 269 p.