

Generación de dolinas en medios aluviales con modelos analógicos

Doline generation in alluvial deposits with analogue models

ÓSCAR PUEYO ANCHUELA¹, TERESA ROMÁN BERDIEL¹, JAVIER GRACIA ABADÍAS²,
PEDRO LÓPEZ JULIÁN³, ANDRÉS POCOVÍ JUAN¹, ANTONIO CASAS SAINZ¹ Y CRISTINA
GARCÍA LASANTA¹

¹ Área de Geodinámica Interna. Departamento de Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza.

E-mails: opueyo@gmail.com, mtjrb@unizar.es, apocovi@unizar.es, acasas@unizar.es, lasanta@unizar.es

² Control 7 S.A.U. E-mail: grabaja@control7.es

³ Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia (Zaragoza). Universidad de Zaragoza. E-mail: pllopez@unizar.es

Resumen La formación de cavidades y su posterior colapso genera distintos tipos de dolinas en superficie. La evaluación de los riesgos asociados al karst aluvial o cubierto varía respecto la percepción habitual por encontrarse su origen desde varios a decenas de metros de profundidad. Las dolinas no son estáticas; en su desarrollo influye tanto la continuidad del proceso de disolución como la estabilización del terreno aluvial afectado. Estos procesos pueden requerir amplios períodos de tiempo para su estabilización. En este trabajo se propone la realización de una serie de modelos de propagación de cavidades dentro de un material no cementado para que sean realizados por estudiantes en el aula. En estos modelos se evalúan las dimensiones de la cavidad en el subsuelo, la variación del comportamiento del aluvial a partir de cambios de sus propiedades y la estabilización dinámica de dichas evidencias. En este trabajo se propone además la utilización de distintas técnicas de investigación del fenómeno y la obtención de conclusiones a partir de un caso práctico que puede resolverse con ayuda de los resultados obtenidos en los ensayos. Este ejercicio consiste en la determinación de la influencia de las propiedades del material aluvial en la propagación de cavidades, y en la comparación de los resultados que pueden obtenerse en función del carácter estático-instantáneo y dinámico-estable de estos fenómenos. Como aspecto transversal a los conceptos adquiridos durante la realización de la actividad, se fomenta también la discusión y evaluación de datos con pensamiento crítico y la aplicación del método científico a partir de los datos obtenidos en laboratorio.

Palabras clave: Estudio de caso, experimentación en el aula, método científico, karst aluvial, modelización analógica.

Abstract *The formation of cavities and their collapse give rise to different types of dolines on the surface. Hazard evaluation of this kind of alluvial or mantled karst processes differs from usual assessment of karst phenomena because the origin of the process is located at a depth of several to tens of meters. Dolines are not static; their development is affected by the solution process and the stabilization of alluvial materials. This stabilization can take place over long periods of time. In this work we propose an activity to be carried out by students in the classroom: they have to develop several analogue models of karst cavity propagation within a non-cemented material. By doing this, they study cavity size, behavior change of the alluvial series and dynamic stabilization. We also suggest the use of different information sources, a question to be answered from the data obtained, evaluation of the influence of the alluvial characteristics on cavity propagation, static-instant versus dynamic-stable phenomena, as well as fostering debate and data evaluation by applying the scientific method on instrumental laboratory data.*

Keywords: *Analog model, case study, classroom experimentation, mantled karst, scientific method.*

INTRODUCCIÓN

Las consecuencias de los procesos del karst aluvial o karst cubierto son habituales en las cuencas cenozoicas ibéricas en las que coexisten series asociadas a materiales evaporíticos cubiertos por materiales insolubles, principalmente fluviales. En estos casos, a diferencia del concepto kárstico clásico en calizas, existen dos factores diferenciales, por un lado la presencia de fases evaporíticas muy solubles en condiciones de alta disponibilidad hídrica, y por otro lado, que el proceso de disolución en el subsuelo se produce en una unidad localizada a varios metros de profundidad y donde la manifestación superficial del proceso kárstico depende de las características del material que recubre los materiales solubles.

En el sector central de la cuenca del Ebro, y en la propia ciudad de Zaragoza, estos procesos son habituales (Simón *et al.*, 2012) y pueden generar tanto dolinas de colapso (su expresión superficial se produce de forma repentina) como de subsidencia (su expresión superficial se produce de forma progresiva). Estas morfologías se relacionan con la propagación de cavidades desde el substrato evaporítico de la Fm. Zaragoza (Quirantes, 1978) hasta superficie. En este sentido, las características de los materiales más superficiales -aluviales en el caso de Zaragoza- y su ángulo de estabilidad condicionan el radio de propagación en superficie y la tipología de las dolinas generadas. En este trabajo presentamos unas consideraciones sobre esta casuística a través de un ejercicio en el que los estudiantes pueden tomar decisiones a partir de los datos obtenidos de la experimentación e incorporar distintas fuentes de información en la toma de decisiones. En este sentido, es de especial relevancia hacer referencia al hecho de que el planteamiento de la actividad permite evaluar la conveniencia de alternativas a la hora de la toma de decisiones y emisión de conclusiones. Sin embargo, y aunque con los datos obtenidos no se puedan descartar otras fuentes de riesgo kárstico en el mismo contexto, esta actividad sí permite evaluar para un caso concreto y del lado de la seguridad, las características de los riesgos que deben ser tenidos en consideración en el contexto analizado y relacionado con la forma en la que las cavidades kársticas se propagan a través de materiales granulares no cementados.

PLANTEAMIENTO DE LA ACTIVIDAD

Enunciado del problema

Un amigo nos solicita consejo sobre la compra de una vivienda localizada en las inmediaciones de una dolina. Él nos pregunta sobre si debería invertir en la compra o si por el contrario, dado que se encuentra en las proximidades de una dolina conocida, debería evitar su compra por si pudieran existir afecciones en el futuro por ampliación del radio de dicha dolina.

Propuesta de trabajo

Para resolver este problema vamos a plantear una evaluación geométrica sencilla de lo que representa una dolina aluvial que incluye las carac-

terísticas de los materiales presentes en la zona y la profundidad a la que se encuentra la unidad soluble en el subsuelo. Por otro lado, necesitaremos también mostrarle a nuestro amigo de forma didáctica el concepto de dolina aluvial y sus consecuencias, por lo que tendremos que evaluar los datos y presentarle una síntesis de los resultados obtenidos. Para ello decidimos realizar una serie de modelos de laboratorio en los que podamos evaluar, de forma directa, la influencia que tiene la propagación de un colapso o cavidad profunda hacia la superficie y qué consecuencias tiene en los materiales superficiales.

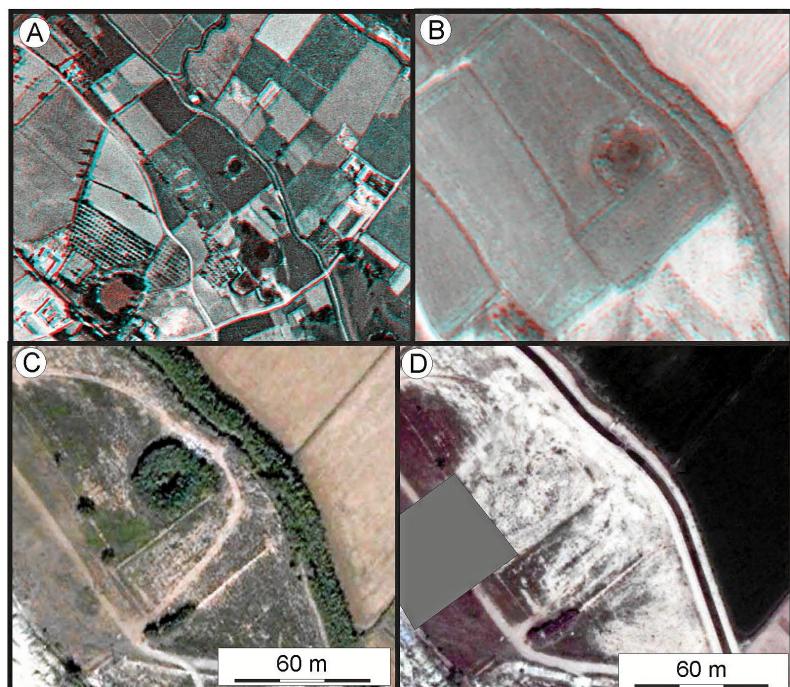
Material necesario

Esta actividad puede realizarse de forma conjunta por todos los estudiantes, de forma progresiva o en paralelo por varios grupos. En el caso de realizarse por varios grupos a la vez, es necesario contar con varios conjuntos (sets, kits,...) de los materiales descritos a continuación.

Para la realización de la actividad es necesario contar con un recipiente de plástico al que le haremos un pequeño agujero en el fondo, en el caso analizado se ha realizado el ensayo en un recipiente de 11 litros de capacidad. Para el material granular se ha utilizado un volumen de 6 litros de arena cuarcosa de grano fino y un volumen de 1 kg de harina. Para la medida de las dimensiones en planta de la dolina se ha contado con una regla. Por su parte, la medición de la inclinación de las paredes del ensayo se ha efectuado por medio de un compás al que se le había añadido un nivel para asegurar su horizontalidad durante las medidas. Dichas medidas se trasladaban después a un transportador de ángulos para realizar la lectura de los grados.

Se cuenta además con información previa que incluye fotografías aéreas con pares estereoscópicos (vuelos de 1956 y 1998; Fig. 1A y B) y ortofotografías recientes de la zona (Fig. 1C y D). Estas fotografías permiten evaluar las dimensiones y ca-

Fig. 1. Contexto de evaluación del problema. A) Par estereoscópico (anaglifo) de la fotografía aérea de 1956. B) Par estereoscópico (anaglifo) de la fotografía aérea de 1998. C y D) Ortofotografías aéreas de la zona de estudio de 2005 y 2013.



racterísticas de la dolina conocida como también las modificaciones recientes que hayan podido reducir su identificación. La serie geológica esperada de la zona está representada por una unidad de terraza compuesta principalmente por gravas, aunque en su parte superior el contenido en materiales de la fracción arcilla aumenta (suelos y materiales de llanura de inundación). Estos materiales se prolongan hasta los 18 m de profundidad donde se identifican niveles arcillosos y margosos con intercalaciones de niveles yesíferos. En el entorno de la zona de estudio, esta unidad se relaciona con el substrato evaporítico inferior y la aparición progresiva de yeso en la serie responde a un perfil de alteración del macizo rocoso en el que, en su parte superior, la disolución ha disminuido la cantidad de yeso.

Conceptos básicos y variables estudiadas

Los niveles aluviales, no cementados, ante un proceso kárstico en el subsuelo, se acomodan a las cavidades generadas y desarrollan una geometría de tipo reloj de arena debido a la propagación hacia superficie de la cavidad. Los materiales granulares no consolidados migran para llenar la cavidad, de modo que su desarrollo genera en el aluvial un cono de afección con vértice en la posición de la cavidad original.

La geometría del cono generado dependerá de varios factores, entre ellos, la profundidad de la cavidad, el volumen de la cavidad formada y las características del material aluvial. El planteamiento de la actividad es constatar a través de la realización de modelos analógicos, y para una profundidad determinada, cómo influye el cambio de las características de los materiales granulares en el cono generado y en la propagación de la cavidad a través de ellos. Se considera también el volumen de la cavidad, a través de la realización de varios estadios (varios volúmenes de cavidad generada) para cada tipo de material granular ensayado.

Durante la realización del modelo se valora:

· En primer lugar, la evaluación del radio generado (Fig. 2) para un volumen constante de cavidad y donde se modifican las características del material. Se parte de un modelo inicial con arena suelta en el que el ángulo de estabilidad o reposo depende principalmente de su ángulo de rozamiento interno. El ángulo de reposo o de estabilidad se define como el ángulo máximo en el que un montículo de suelo se mantiene estable sin que se produzca su desmoronamiento. En el caso de estudio, se valorará dicho ángulo a partir de la pendiente del contorno de la geometría cónica generada por la migración del material hacia la cavidad inferior. Según progresó la actividad, se va incorporando material más fino (harina) a la arena, para que en los sucesivos modelos aumente su comportamiento cohesivo y genere ángulos de estabilidad mayores.

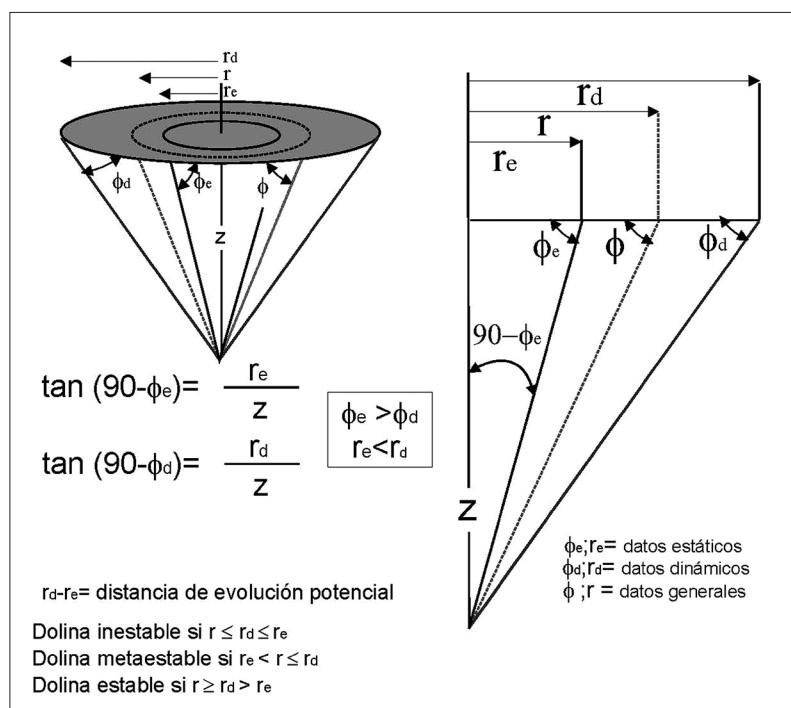
· En segundo lugar, se valora el ángulo estático (generado a partir de la estabilización del modelo por la formación de la cavidad), y el ángulo dinámico (Fig. 2), en el que se somete al modelo a vibraciones que pudieran representar terremotos, circulación de vehículos rodados en el entorno de la zona analizada o los cambios que pudiera generar la subida y bajada del nivel freático. Es decir, incorporar en el modelo el factor tiempo en su estabilización. El primero de los ángulos se define como ángulo de estabilidad estático (ϕ_e) y el segundo define el ángulo de estabilidad dinámico (ϕ_d). Ambos ángulos producen radios diferentes en superficie para el mismo volumen de cavidad y material (una evaluación conceptual de las relaciones entre el ángulo de estabilidad, el cono generado y la profundidad se incluye en el gráfico de la figura 2).

Ejecución del ensayo de laboratorio

Se incluye una propuesta de realización del ensayo en la figura 3. Se utiliza un recipiente con un agujero en su parte inferior como comunicación entre la cavidad que se va a generar y el modelo de arena (las dimensiones de dicho agujero dependerán del tamaño de la arena utilizada y de su comportamiento, en el caso planteado en el que se ha utilizado arena de grano fino, se realizó un agujero de 5 mm de diámetro en el fondo del recipiente). Para la realización de la actividad se coloca el recipiente sobrelevado para poder acceder a la parte inferior del mismo (Fig. 3A). Bajo el modelo se coloca un recipiente de cristal que actúa a la vez como cierre del agujero del fondo del recipiente (Fig. 3B) y como cavidad a través de su intercambio con un segundo recipiente de cristal. El uso de este recipiente permite también el control del volumen de arena evacuado en cada fase del modelo. Como puede identificarse en la figura 3C, para realizar un mayor número de estadios de evolución no se utilizó el recipiente de cristal vacío, sino parcialmente llenado.

Tras verter la arena sobre el recipiente de estudio, realizamos unas líneas de referencia en dos direcciones perpendiculares para poder identificar mejor la superficie afectada por la propagación de la cavidad. En nuestro caso hemos utilizado arena de otro color para realizar las líneas de referencia (se incluye entre la documentación complementaria anexa a este trabajo explicaciones más detalladas

Fig. 2. Planteamiento geométrico de la propagación cónica de cavidades valorando distintos ángulos de estabilidad (ϕ_e estático y ϕ_d dinámico), la profundidad de la cavidad (z) y el desarrollo de radios de afección superficial (r).



sobre su realización). En el momento en que cada uno de los estadios finaliza, si el volumen evacuado genera un colapso en el que no se identifica el agujero del fondo del recipiente, se mide el ángulo de estabilidad estática de las paredes (en ocasiones se pueden realizar varias medidas de la geometría generada, Fig. 3D) y el diámetro del colapso formado (para obtener un valor medio se toman medidas en dos direcciones perpendiculares siguiendo las líneas de referencia de la superficie del modelo, de forma que en cada estadio se mide la misma orientación y posición). Dado que el modelo se filmó en toda su elaboración, la morfología exacta de cada estadio se pudo determinar después. En los casos en que al producirse el vaciado de arena el colapso se detiene sin que se complete el llenado de la cavidad (recipiente de cristal) y se identifica en el fondo del colapso el agujero del recipiente, se realizan las medidas planteadas previamente pero se insta al modelo a que siga evolucionando, como se indica más adelante, a fin de que la generación de la dolina responda al volumen completo de la cavidad (en este caso se mide también el ángulo de estabilidad dinámico y el diámetro dinámico).

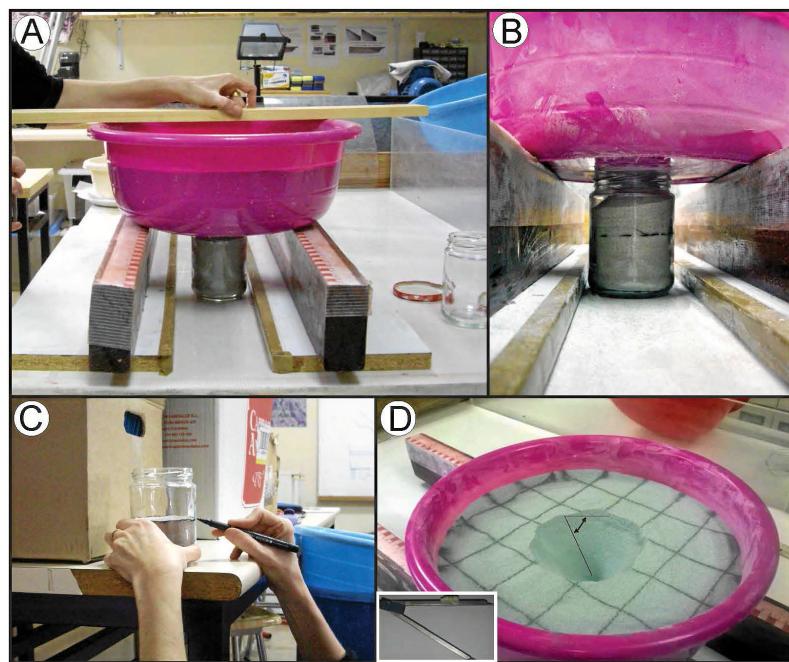
La actividad propuesta, como ejemplo, en este trabajo se realizó a partir de 7 modelos para 7 mezclas distintas de material, partiendo de un modelo de arena e incorporando en cada nuevo ensayo un volumen de harina al modelo (se eligió un recipiente que permitiera su uso directo con un volumen de 175 cm³-un vaso mediano-). El ensayo se puede realizar de igual forma aportando una masa constante, aunque por sencillez, realizamos un aporte volumétrico en el ensayo; en el que cada aporte de 1 vaso de harina representaba un aporte de un 3% de volumen de material al modelo. En caso de realizarse un número menor de ensayos en el aula es recomendable incluir los extremos analizados (Estadios 1 y 7; y los estadios intermedios que interesen en función de los grupos de trabajo que se organicen en el aula).

A modo de evaluación paso a paso se indican las acciones seguidas en la realización del ensayo:

i) Colocación del recipiente de plástico vacío sobre el pedestal, con el recipiente de cristal situado bajo el agujero realizado en el recipiente de plástico. Rellenado del recipiente de plástico, homogeneización de la superficie y marcado de líneas de referencia.

ii) Desplazamiento del recipiente de cristal localizado en la base del modelo por un nuevo recipiente de cristal (en el caso realizado, los recipientes aportados se encontraban parcialmente llenos para reducir el volumen en cada evacuación: el modelo realizado planteaba un volumen de desague en cada vaciado de 100 cm³).

iii) Identificación de la propagación de la cavidad hacia la superficie, medida del ángulo de estabilidad estático con ayuda de un compás y medida con una regla transparente de las dimensiones en las dos direcciones marcadas por las líneas de referencia incluidas en el modelo. Anotación de los datos del ángulo o ángulos y de los diámetros en el cuaderno de laboratorio. Estos datos pueden incluirse en una hoja de cálculo también para su representación. En los casos en que la propagación de la cavidad había



permitido identificar el fondo del recipiente (esto es especialmente habitual en los volúmenes ensayados con mayor contenido en harina) se provocaba una perturbación "sísmica" golpeando verticalmente con el puño la mesa, para reiniciar el ensayo que se había interrumpido. Cuando se obtenía un recubrimiento del fondo, se volvía a medir el ángulo de estabilidad y el radio (en este caso las medidas se apuntaban en el cuaderno como ángulo de estabilidad dinámico y radio de equilibrio dinámico).

iv) Se cambia el recipiente de cristal localizado bajo el modelo, por un nuevo recipiente vacío (o parcialmente lleno) para reiniciar el proceso como si existiera la generación de una nueva cavidad por debajo del modelo de arena. Se realizan de nuevo las medidas, tanto de los ángulos de estabilidad estática como dinámica, como de los radios estáticos y dinámicos. Este proceso se repitió entre 6 y 8 veces. Por otro lado, el ensayo se realizó también para 7 mezclas de arena-harina diferentes (arena, arena + 1 vol. harina,..., arena + 6 vol. harina). Como material complementario se aporta la información obtenida de los distintos episodios en formato digital para poderlos utilizar como complemento a los realizados en el aula.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS Y REPRESENTACIÓN (GUÍA DE EVALUACIÓN DE DATOS)

La integración de los resultados obtenidos dependerá de la forma en que se haya realizado la actividad en el aula. Ésta se ha podido realizar de forma conjunta, o donde distintos grupos de trabajo han obtenido datos parciales que requieran ser presentados al resto del aula. Con independencia de cómo se presenten, será necesario hacer referencia en su presentación a la descripción del ensayo (ángulos y radios de estabilidad estáticos y dinámicos) y relación ángulos-dimensiones con el volumen evacuado. Los resultados obtenidos de todos los ensayos se representarán en conjunto para su discusión. Se incluye en

Fig. 3. Material de laboratorio y metodología de realización del ensayo. A) Soporte para la realización del ensayo con la cavidad inferior cerrada con un recipiente de cristal lleno. B) Detalle del recipiente inferior del modelo. C) Para obtener un mayor número de vaciados durante el proceso de ensayo se realizó un relleno parcial del vaso. D) Vista oblicua del modelo y representación del ángulo de estabilidad medida y fotografía del compás preparado para las medidas.

		ÁNGULO DE ESTABILIDAD	DIÁMETRO (CM)
Ensayo 1	Vaciado 1	36	11,5
	Vaciado 2	40	15
	Vaciado 3	40	17
	Vaciado 4	40	17
	Vaciado 5	40	18,5
	Vaciado 6	40	21,5
	Vaciado 7	40	22
Ensayo 2	Vaciado 1	40	9,25
	Vaciado 2	40	13,75
	Vaciado 3	38	15,5
	Vaciado 4	40	17,15
	Vaciado 5	40	18,5
	Vaciado 6	40	19
Ensayo 3	Vaciado 1	57	8,75
	Vaciado 2	56	11,5
	Vaciado 3	54	14,25
	Vaciado 4	50	14,7
	Vaciado 5	49	16,75
	Vaciado 6	49	18,5

Tabla I. Resultados obtenidos durante la realización de los ensayos en este trabajo. Se incluye la tabla de los valores obtenidos que se han utilizado para la representación de datos en la figura 4.

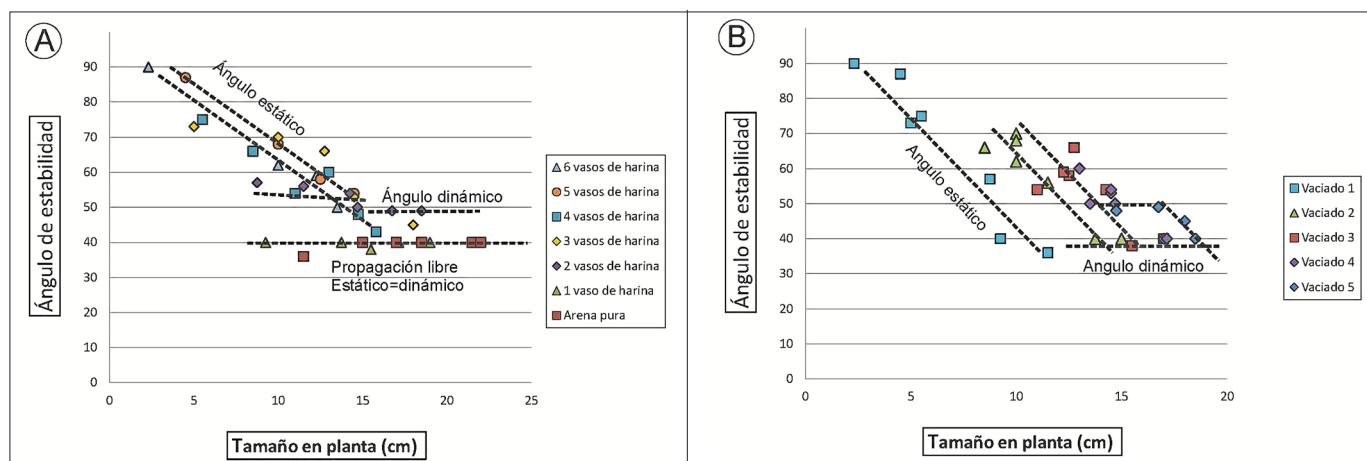
la figura 4 una propuesta de representación de los resultados que también se recoge en la tabla I.

A continuación incluimos una descripción de los datos obtenidos que puede servir como guía para la discusión con los estudiantes en el aula. La representación de los resultados en la figura 4A, relaciona el ángulo de estabilidad con el diámetro medio en planta y permite identificar que existen dos tendencias principales en la distribución de datos. En este caso, los modelos realizados únicamente con arena o con arena + 1 vol. de harina muestran una tendencia subhorizontal donde el tamaño depende únicamente del volumen desalojado y donde el ángulo de estabilidad está próximo a 40° (en el laboratorio se midieron valores entre 38° y 41°). Todos estos ensayos

		ÁNGULO DE ESTABILIDAD	DIÁMETRO (CM)
Ensayo 4	Vaciado 1	73	5
	Vaciado 2	70	10
	Vaciado 3	66	12,75
	Vaciado 4	53	14,5
	Vaciado 5	45	18
Ensayo 5	Vaciado 1	75	5,5
	Vaciado 2	66	8,5
	Vaciado 3	54	11
	Vaciado 4	60	13
	Vaciado 5	48	14,75
	Vaciado 6	43	15,8
Ensayo 6	Vaciado 1	87	4,5
	Vaciado 2	68	10
	Vaciado 3	58	12,5
	Vaciado 4	54	14,5
Ensayo 7	Vaciado 1	90	2,3
	Vaciado 2	62	10
	Vaciado 3	59	12,25
	Vaciado 4	50	13,5

responden a ángulos de estabilidad en los que no fue necesario perturbar el modelo y donde los ángulos estáticos y dinámicos son por tanto iguales. En el caso del ensayo con 3 volúmenes de harina, se identificaron ángulos de estabilidad de alta pendiente pero que colapsaban por sí solos durante la realización del modelo, generando dos familias de datos en función de si se mide el ángulo metaestable o estable. Este aspecto produce una pauta irregular de los datos con dos tendencias diferentes. En el resto de ensayos con mayor contenido en harina, los datos se disponen sobre una regresión doble con una correlación lineal entre el ángulo de estabilidad y el tamaño en planta, y otra en la que el tamaño de la dolina depende sólo del volumen evacuado.

Fig. 4. Gráficas de los principales resultados obtenidos en los ensayos. A) Representación de las dimensiones de las dolinas frente al ángulo de estabilidad medido en los modelos. Los resultados aparecen agrupados por el número de ensayo (mezcla utilizada en cada ensayo). B) Representación del tamaño en planta de las dolinas generadas y el ángulo de estabilidad agrupados por el número de vaciado (igual volumen desalojado) de los ensayos. En ambos gráficos se han incluido unas líneas de regresión haciendo referencia a su significado respecto a los modelos (ángulos medidos estático o dinámico).



La evaluación de los modelos realizados permite identificar que en algunos casos no pudieron obtenerse los radios de estabilidad dinámica y estática, por lo que se midió sólo el ángulo estático (modelos 1 a 3) que es igual al dinámico, o se midió el ángulo dinámico por no producirse el vaciado completo del volumen.

Si se representan de forma conjunta los datos para cada uno de los episodios de vaciado, es decir, agrupados por el número de vaciado (Fig. 4B), se identifica una relación directa entre el ángulo de estabilidad y el diámetro para cada uno de los vaciados (la relación varía en función del material utilizado en cada ensayo). También se observa la presencia de tendencias horizontales para determinados ensayos que son independientes de la mezcla utilizada (en el entorno de los 40°).

En los casos en que se miden los dos ángulos de estabilidad, cada valor depende de la mezcla utilizada para el ensayo y del volumen evacuado, pero en unos casos el ángulo es estable con independencia del volumen evacuado (caso de los ensayos con poco contenido en harina), mientras que en los otros casos la adición de un volumen mayor de harina genera ángulos estáticos mayores, pero que no son estables ante la generación de vibraciones. El ángulo estático o dinámico mínimo es el que tiene el material original (arena) que es próximo a 40°, el resto de los ángulos obtenidos son mayores en estático pero muy similares en la medida dinámica (tienden a aproximarse a 40°). Esto supone que la estabilidad de las paredes de una dolina depende del material presente, es independiente del volumen de la cavidad en el subsuelo, su radio depende de las características del material y de si la dolina es estable o metaestable. Es decir, un ángulo de estabilidad estática se define como metaestable porque ante vibraciones en la zona podría llegar a alcanzar un ángulo más estable y próximo al identificado para el material de arena de forma aislada.

Si se aplica el mismo razonamiento a los radios medidos en los ensayos, se puede identificar un radio de afección superficial que depende de si se miden las dimensiones de una dolina estable o metaestable. Estos datos se pueden evaluar de forma gráfica en las figuras 5 y 6. En la figura 5 se incluyen las fotografías de los estadios de primer vaciado para las 7 mezclas utilizadas. En el caso de los estadios 1 a 3 (Fig. 5A) se puede identificar como el desagüe genera el llenado completo del recipiente de cristal localizado bajo el modelo. En el caso del estadio 4, el vaciado del modelo se produce sin perturbaciones, pero se puede identificar (a partir de los videos realizados durante el modelo) la generación temporal metaestable de una sección que se mantiene durante unos segundos y que colapsa posteriormente (Fig. 5B E4_v001a). Este mismo aspecto se identifica en todos los modelos posteriores realizados en los que el tamaño de la sección afectada va disminuyendo con cada uno de los materiales analizados (mayor incremento del contenido en harina) y que además, es necesario perturbar el modelo para que se realice el relleno del hueco que se encuentra en su parte inferior. Este aspecto permite observar cómo el radio de afección de la dolina es diferente en función de la mezcla utilizada para el

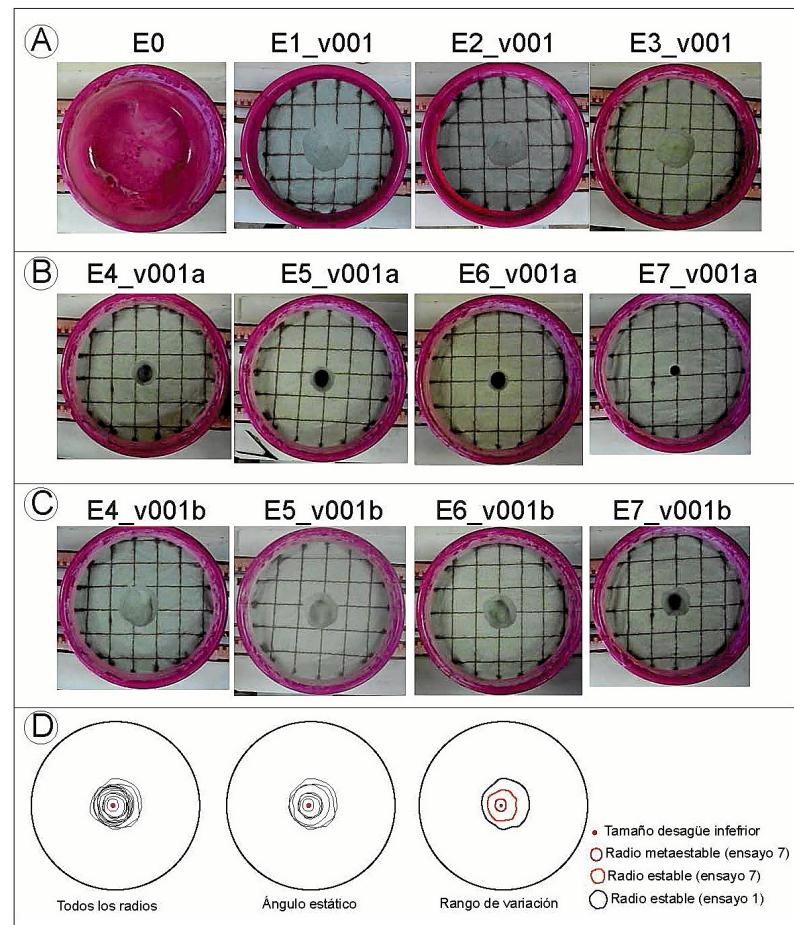
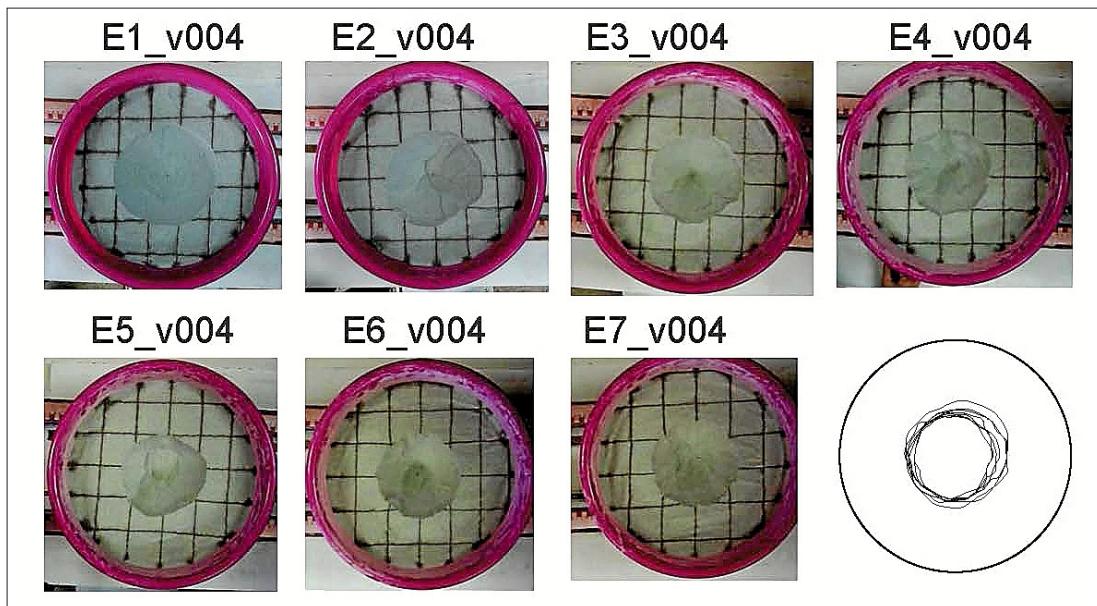


Fig. 5. Principales resultados obtenidos durante los ensayos realizados en el primer vaciado del modelo. En los 3 primeros ensayos (arena, arena + 1 vaso de harina y arena + 2 vasos de harina) el cono se estabiliza progresivamente durante el vaciado. A partir del ensayo 4 se identifican incrementos de la cohesión del material que generan la identificación del agujero del embase del modelo. A partir de este ensayo se pueden medir los radios y ángulos de estabilidad estáticos B) y dinámicos C). En D) se presenta la comparación de los cambios de las dimensiones en planta para todos los modelos, los relacionados con el ángulo estático y los rangos máximos de variación.

modelo, pero en el que la dimensión de la sección final (dinámica) es muy similar para todos los estadios de ensayos realizados. Este aspecto puede evaluarse a partir de las fotografías de los modelos en las figuras 5B y C, donde la dolina se mantiene metaestable pero que colapsa posteriormente (sola o motivada por vibraciones) y cambia el resultado final del ensayo. Estas variaciones se pueden evaluar de forma conjunta en la figura 5D.

Este aspecto es más evidente cuando se evalúan estadios más avanzados del modelo (Fig. 6). Para este análisis se ha seleccionado el estadio 4 de los modelos para todos los ensayos realizados. En el estadio 4, el ángulo de estabilidad dinámico obtenido es próximo al intrínseco de material y el radio de afección en planta (radio dinámico) es muy similar para todos los casos. En estos casos, las dimensiones finales en planta de la dolina dependen del volumen evacuado en profundidad, pero no así de las características del material si se permite su evolución temporal (se alteran las condiciones; vibraciones antrópicas o naturales en la zona) generando un radio final de dimensiones muy similares.

Fig. 6. Resultados para cada uno de los ensayos realizados en el episodio 4. Los resultados presentados son las dimensiones relacionadas con los ángulos dinámicos de estabilidad. Se incluye un gráfico en el que se superponen los distintos radios obtenidos y donde puede identificarse dimensiones similares con independencia de la mezcla utilizada durante el ensayo.



APLICACIÓN DE LO APRENDIDO EN EL LABORATORIO AL CASO PLANTEADO

El estudio realizado a partir del análisis de las fotografías aéreas de la figura 1 permite determinar cuál es la evidencia superficial de una dolina. La infor-

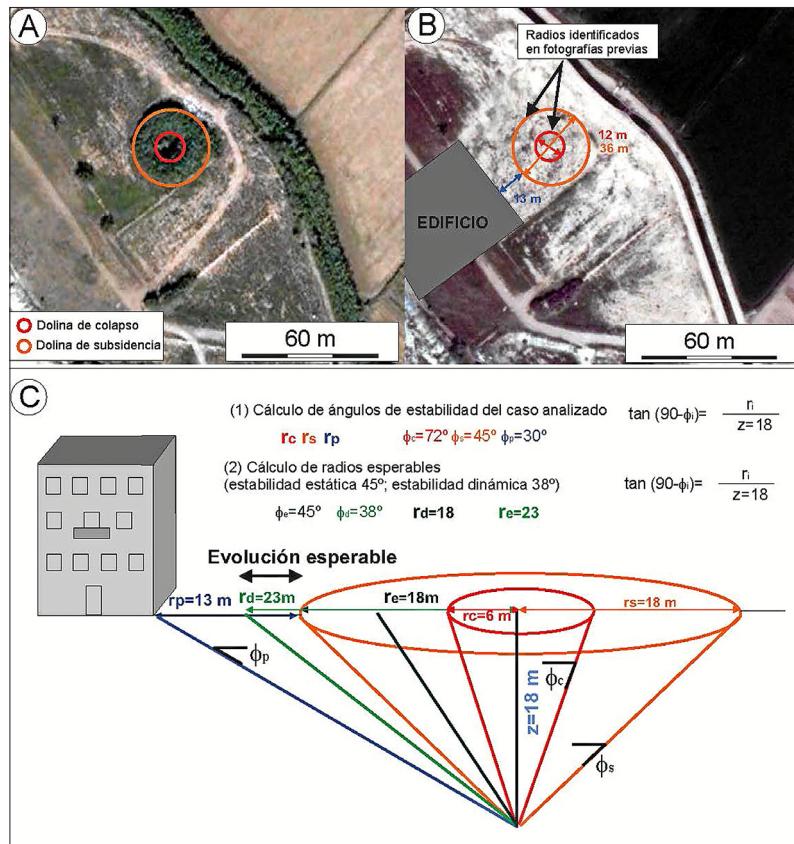


Fig. 7. Radios y cálculos realizados sobre el caso de estudio. A) Ortofotografía aérea con la identificación de los radios de la dolina de colapso y subsidencia. B) Cálculos de los radios identificados y distancia del margen de la dolina con el edificio planteado. C) Cálculos geométricos a partir de la información disponible sobre la geometría de la dolina valorando los radios de colapso (rc), subsidencia (rs) y de estabilidad estática (re) y dinámica (rd). ϕ_p y rp corresponden al ángulo de estabilidad mínimo y el radio mínimo que debería tener el material para que afectara al edificio.

mación geológica previa disponible permite conocer las características de la serie geológica y la posición del substrato evaporítico (profundidad en la que se encuentran los materiales solubles y el sector de arranque de la migración de los materiales aluviales). En las imágenes de las figuras 1 y 7 se puede identificar la presencia de una geometría de colapso y una orla muy vegetada asociada a un contexto con procesos de subsidencia y grietas superficiales (Fig. 7A). Las dimensiones de los diámetros de las formas identificables, como puede medirse en las figuras incluidas, son de 12 m para el colapso, 36 m para la orla de subsidencia que la acompaña y la distancia al edificio planteado es de 13 m desde la orla de grietas y subsidencia (Fig. 7B). Esta asociación de geometría de colapso y subsidencia en su entorno es muy similar a las morfologías identificadas en los ensayos de laboratorio (ver por ejemplo modelos de la figura 5: E4_v001a y b o E5_v001a y b).

Aplicando lo identificado en los modelos, se pueden definir varios radios o ángulos de estabilidad para el caso analizado: i) ángulo de reposo instantáneo o estático y su radio superficial (ϕ_e y r_e) y ii) ángulo de reposo dinámico y su radio superficial (ϕ_d y r_d). Estos datos permiten realizar una construcción geométrica sencilla donde se puede establecer cuál sería el radio de afección superficial de cada uno de los ángulos (Fig. 7C). Por otro lado, dado que el objetivo era evaluar la afección a la edificación planteada, se puede realizar también el cálculo inverso para determinar el ángulo de estabilidad mínimo que debería tener el material para que afectara o no al edificio (ϕ_p y r_p).

Si valoramos la geometría del colapso identificado (rc) en fotografía aérea, el ángulo de reposo (ϕ_c) es de 72° , mientras que para el caso de la zona de subsidencia este ángulo (ϕ_s) es de 45° . Ambos ángulos de estabilidad se encuentran por encima de los valores habituales para materiales granulares como los presentes en la zona, lo cual les confiere una condición inestable. Si realizamos el cálculo de los radios de afección obtenemos $rc = 6$ y $rs = 18$ m mientras que la vivienda se encuentra a 13 m de la dolina. Para que la dolina alcanzara el edificio que

se encuentra a 31 m del borde de la dolina de colapso, el ángulo de estabilidad dinámica de los materiales (ϕ_p) debería ser inferior a 30° .

A partir de esta construcción geométrica y valorando únicamente un comportamiento homogéneo para la serie con un ángulo de estabilidad comprendido entre los 30 y 45° , el borde de migración de la dolina se encontraría próximo al borde de subsidencia identificado o con una ampliación que podría alcanzar los 5 m con respecto a dicho borde. Valorando el rango de valores habituales de los materiales presentes en la zona se podría esperar un valor medio próximo a los 38° (entre 30 - 45°), que es similar al identificado en los ensayos de laboratorio realizados para el ángulo de estabilidad dinámico.

Es decir, con los datos obtenidos no parece previsible la afección a la vivienda por propagación de la dolina. En estos casos siempre es necesario contar con datos directos de la zona, por lo que el mismo cálculo puede realizarse de forma inversa para evaluar cuál sería el ángulo de reposo que deberían tener los materiales de la zona para que la propagación de la dolina alcanzara la vivienda. En este sentido, cuando se realizaran los datos de caracterización geotécnica de los materiales debería valorarse que el ángulo de estabilidad debería ser superior a los 30° calculados (tanto dinámico como estático) para que no existiera afección (rp en Fig. 7C).

USO DE LA EVALUACIÓN REALIZADA EN UN CASO REAL

El karst aluvial supone evaluar la interacción entre la generación de una cavidad, su propagación hacia superficie y el tipo de material afectado. Estos factores producen que, en ocasiones, las evidencias de disolución no estén en la vertical de los conos de propagación considerados, es decir, no estén en toda la vertical de la dolina. En los ensayos realizados se ha podido constatar que la cavidad original, aunque de amplias dimensiones, tenía una conexión con el modelo de arena de unos pocos milímetros frente al tamaño final decimétrico de la dolina generada. Esta relación define un cambio de varios órdenes de magnitud que podrían ser de aplicación en la realidad a partir del escalado del modelo con un caso real.

En este sentido, son numerosos los casos en los que no existen criterios geotécnicos inequívocos del proceso kárstico cuando se realizan ensayos en las orlas de subsidencia. En estos contextos no tienen porqué existir cavidades en la vertical de los materiales que definen las orlas concéntricas de subsidencia de una dolina. Estos materiales que han sufrido un proceso de migración pueden haber desarrollado una pérdida de resistencia pero seguir manteniendo unas características geotécnicas aptas si se evalúan de forma estática. El caso planteado previamente fue analizado en detalle por Pueyo Anchuela *et al.* (2013) para determinar, a partir de criterios indirectos (geofísicos), de inspección visual y análisis histórico-geomorfológico, la necesidad de la utilización de radios de seguridad en el entorno de las dolinas para evitar afecciones futuras asociadas a la migración lateral de los materiales hacia

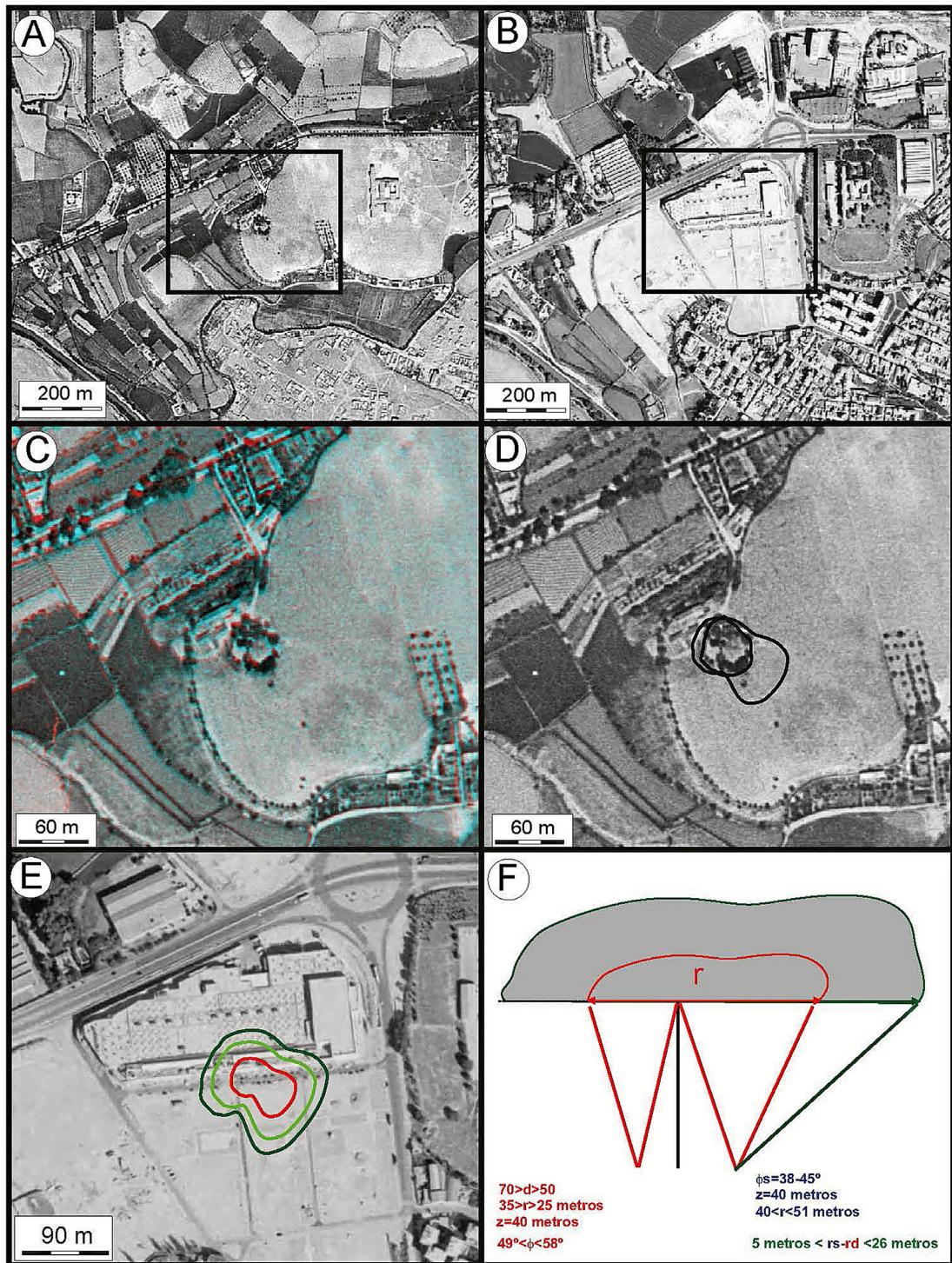
el sector colapsado. Medidas similares habían sido planteadas en el propio PGOU de la ciudad de Zaragoza, pero la ausencia, en muchos casos, de criterios geotécnicos inequívocos ha provocado que no sean de aplicación sistemática.

En el caso práctico analizado (Fig. 7) la inspección realizada sobre el terreno permitió identificar la presencia de grietas superficiales a una distancia mayor que la planteada con los cálculos realizados (ver Pueyo Anchuela *et al.*, 2013) lo que supondría un ángulo de estabilidad de los materiales inferior al planteado de 30° a partir de los datos considerados para la afección al edificio. Estos datos suponen que aunque la evaluación general puede beneficiarse de este tipo de valoraciones, se requiere de la evaluación detallada de las condiciones reales de los materiales a distancias de varias decenas de metros con respecto a las dolinas, y donde las conclusiones obtenidas pueden utilizarse como criterios positivos de exclusión pero no de seguridad sin estudios detallados en dichos contextos.

La evaluación planteada previamente, aunque a nivel teórico y como planteamiento del problema, permite comprender aspectos geométricos relacionados con dolinas aluviales. Comentaremos en este apartado las consideraciones que deberían haberse valorado, a partir de los aspectos analizados en este trabajo, en un grupo de viviendas localizado en la avenida de las Estrellas de la ciudad de Zaragoza. Uno de los edificios presentes en la zona ha sufrido movimientos significativos en los últimos años, principalmente asociado a movimientos de tipo lateral (apertura de juntas de dilatación que han llegado a superar los 1-2 mm/mes). En esta zona se conocía la presencia de una dolina previamente a la construcción de la vivienda y fue incorporada como dolina nº 1 del inventario del PGOU de la ciudad de Zaragoza (Simón *et al.*, 1998). Además, se puede identificar en las fotografías aéreas históricas de la ciudad de Zaragoza (ver Fig. 8A). Sin embargo, la urbanización de la zona disminuyó su identificación en superficie (Fig. 8B). Su geometría se podía observar en las fotografías históricas de la ciudad de Zaragoza desde 1927 y era evidente en las fotografías de 1956 (Fig. 8C y D). Por otro lado, esta misma dolina afectó a un grupo de naves industriales que se encontraban construidas en la vertical de dicha dolina (ver por ejemplo Gutiérrez *et al.*, 2009; Pueyo Anchuela *et al.*, 2012).

Una comparativa de las fotografías de 1956 y 1998 permite identificar los cambios urbanísticos de la zona, y la presencia de una dolina en la fotografía de 1956 que desaparece durante la urbanización de la zona (Fig. 8A y B). En el par estereoscópico de las fotografías aéreas de 1956 (Fig. 8C y D) se puede identificar una depresión topográfica de alta pendiente (con un grupo de árboles bordeando dicha geometría; aspecto tradicional utilizado en el entorno de Zaragoza para tratar de estabilizar las dolinas a través del plantado de árboles en sus márgenes). Externamente a esta alineación se identifica una zona que presenta subsidencia hacia el SE de la misma. Esta geometría fue puesta de manifiesto en el propio PGOU de 1998 de la ciudad de Zaragoza en la que se indicaba que la dolina era ligeramente irregular y que podía deberse a la coalescencia de dos dolinas (es decir, una uvala) con unas dimensiones

Fig. 8. Contexto del caso real de la edificación analizada con problemas constructivos recientes. A y B) Fotografías aéreas de la zona de estudio previas a la construcción en la zona (fotografía de 1956) y posterior a la reurbanización de la zona (fotografía de 1998). Se incluye recuadrada la zona ampliada en C y D. C y D) Par estereoscópico (o anáglifo) para la fotografía aérea de 1956 de la zona. E) Ortofotografía de la zona con la localización de la dolina analizada y el contorno de seguridad aplicado en función del radio de estabilidad dinámico esperado. F) Gráfico conceptual en relación a la coalescencia de dos colapsos y los radios de cálculo (ángulo de estabilidad) utilizados en la resolución del ejercicio.



de 70x50 m (Simón *et al.*, 1998).

En este contexto, la construcción de un centro comercial tuvo en consideración la especial complejidad geológica de la zona con cimentaciones profundas para evitar las afecciones de la dolina. Sin embargo, algunos de los bloques de viviendas se construyeron fuera de la dolina de colapso pero en las proximidades de su límite. El edificio analizado en este apartado fue construido en el año 2002 y unos meses después de su puesta en servicio comenzó a mostrar evidencias de movimientos relativos entre las distintas escaleras del edificio. Debido a esto, se han realizado gran cantidad de ensayos y sondeos que han permitido determinar que el es-

pesor del aluvial oscila entre los 28-30 m y los materiales evaporíticos del substrato se identifican a partir de los 38 m. El caso de esta edificación fue judicializado y existe una sentencia sobre la indemnización a los vecinos y un proceso de declaración de ruina de uno de los bloques del edificio por parte del Ayuntamiento de Zaragoza. Si evaluamos lo que hemos aprendido durante la realización de esta práctica se pueden establecer una serie de consideraciones que podrían permitir explicar el origen de los problemas identificados en el edificio de estudio.

Para simplicidad de cálculo y realizar una evaluación de mínimos hemos tomado las dimensiones de la dolina como única (no se valora que sean dos



Fig. 9. Fotografías del edificio que presenta movimientos de basculamiento lateral localizado en las proximidades de la dolina analizada en la figura 8. (A, B, C) Vista general del edificio en el que se identifica la apertura de las juntas de dilatación (se incluyen flechas con los movimientos relativos de desplazamiento identificados). D y E) Detalle de las juntas de dilatación del edificio con indicación del movimiento de apertura relativa. F) Fotografía de las grietas en el garaje de la edificación con indicación del sentido de movimiento identificado.

coalescentes que implicarían ángulos del cono metaestable mayores que los calculados) y valoramos un radio comprendido entre los 25 y 35 m. El cálculo de la pendiente del cono medio obtenido con este cálculo en las imágenes de 1956 estaría comprendido entre los 48 y 57°. Estos valores exceden los habituales para la estabilidad de suelos granulares como el presentado. Los valores habituales de los ángulos estáticos pueden ser similares o incluso superiores, pero dado que se debe valorar el ángulo dinámico (por la presencia de vehículos circulando en su misma vertical) los ángulos intrínsecos del rozamiento interno de dichas unidades estarían comprendidos entre los 38 y 45°.

Esta valoración implicaría una franja de propagación dinámica, sin evaluar la posible evolución futura del proceso de disolución, de entre 5 y 26 m respecto al borde identificado en las fotografías aéreas de la zona. Un valor de 5 m está en el rango de la propia resolución del método utilizado para la identificación del borde de la dolina en fotografía aérea, pero el valor de 26 m sería la representación geométrica mínima para el cálculo de la potencial progresión para una única dolina y un ángulo de estabilidad dinámica de 38° (Fig. 8E y F). En ambos casos, el radio exterior calculado afecta a los dos solares de la fotografía de la Fig. 8E. La edificación localizada en la esquina oriental, a partir del estudio de la fotografía aérea, se encontraría a una distancia de entre 5 y 8 m de la dolina. Esta distancia es un valor que infravalora significativamente la posibilidad de la migración de la dolina debido a la estabilización de los taludes del colapso. Los movimientos de la edificación (Fig. 9A) se articulan a través de las juntas de dilatación y muestran aperturas en ambos lados del edificio hacia la dolina (Fig. 9B y C). Estas juntas presentan diferente apertura según se anali-

zan a distintas alturas del edificio (Fig. 9D y E) y son mayores cuanto mayor es la altura del punto de medida, de forma que en el garaje (Fig. 9F) las grietas se ponen de manifiesto con geometrías semicirculares y escasos movimientos verticales. Este aspecto define un basculamiento del edificio que se articula a través de los elementos más frágiles (juntas de dilatación) y que se relaciona con una pérdida de soporte en la vertical de la esquina de la vivienda más próxima a la dolina. La aplicación de los aspectos aprendidos en este trabajo hubiera requerido la consideración de un radio de seguridad respecto la dolina conocida o medidas especiales de construcción para evitar la afección al edificio construido. Sin embargo, la ausencia de dicha evaluación ha supuesto un periplo judicial de más de 10 años para los vecinos que siguen sujetos a unas hipotecas en unas viviendas que han sido declaradas en ruina por no aplicar los mínimos principios de precaución que los ensayos de laboratorio realizados muestran claramente.

CONCLUSIONES

La propagación de cavidades kársticas a través de materiales no cementados e insolubles se ha evaluado a partir de la realización de un grupo de modelos de laboratorio con arena y harina. El objetivo de la práctica era la realización de varios ensayos que permitieran evaluar cómo varía la propagación de una cavidad a través de un material no cementado en el que se hacen variar sus propiedades. El caso analizado incluye la realización de ensayos, la integración y discusión de resultados, la evaluación científica de los datos y la toma de decisiones. Los resultados obtenidos permiten comprender mejor

cómo influyen las características de los materiales geológicos cuando se produce la propagación de una cavidad kárstica en un medio no consolidado. Esta evaluación, considerando también el carácter estático y dinámico de la estabilidad, permite obtener una comprensión de la evolución de los procesos geológicos a escala de laboratorio y de su perspectiva temporal.

La toma de decisiones y la comparación con un caso real donde aplicar los conocimientos permite incentivar el discurso y pensamiento crítico como también la evaluación de la aplicabilidad de los conceptos aprendidos. Aunque el planteamiento realizado es una simplificación de la problemática real de la zona, este análisis permite obtener una visión 3D de la estructura y de las características de un proceso natural como el analizado. Sin embargo, debe considerarse también que la evaluación realizada representa una aproximación estática en la que no se ha valorado la potencial evolución dinámica asociada a la continuidad de los procesos de disolución o aparición de nuevas cavidades.

Desde un punto de vista aplicado, el conjunto de ensayos realizados y las conclusiones obtenidas, aunque a nivel de laboratorio, permite evaluar distintos factores de aplicación técnica en los que se puede establecer el carácter metaestable de las evidencias superficiales de algunos fenómenos del karst aluvial y definir medidas preventivas o de investigación detallada en contextos próximos a dolinas conocidas que pudieran sufrir evolución superficial debido a su estabilización.

El acceso al material complementario a este artículo está disponible para su descarga en <https://goo.gl/Hr9x7b>.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Grupo de Investigación Geotransfer de la Universidad de Zaragoza (Grupo consolidado del Gobierno de Aragón

y financiado a partir de fondos FEDER). Los autores quieren agradecer los comentarios y sugerencias realizados por José Miguel Andreu Rodes y tres revisores anónimos.

BIBLIOGRAFÍA

Gutiérrez, F., Galve, J.P., Lucha, P., Bonachea, J., Jordá, L. y Jordá, R. (2009). Investigation of a large collapse sinkhole affecting a multi-storey building by means of geophysics and the trenching technique (Zaragoza city NE Spain). *Environmental Geology*, 58, 1107–1122.

Pueyo Anchuela, Ó., Ansón López, D., Pocoví Juan, A., Casas Sainz, A.M., Simón, J.L., Gil, H., Ipas Lloréns, J.F. y Gracia Abadías, J. (2012). Consideraciones sobre la construcción en zonas kársticas activas. Caso de la avenida de las Estrellas de Zaragoza. *Geogaceta*, 51, 63-66.

Pueyo Anchuela, Ó., Pocoví Juan, A., Casas-Sainz, A.M., Ansón-López, D. y Gil-Garbí, H. (2013). Actual extension of sinkholes: considerations about geophysical, geomorphological, and field inspection techniques in urban planning projects in the Ebro basin (NE Spain). *Geomorphology* 189, 135–149.

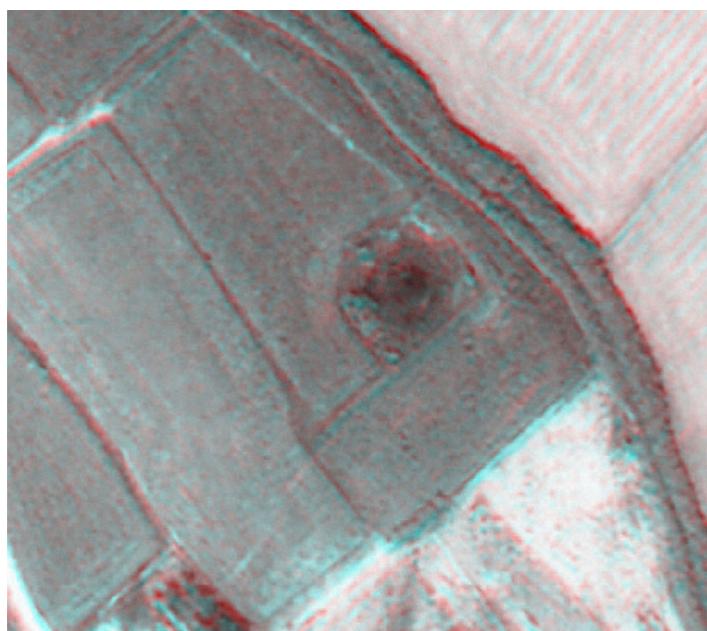
Quirantes, J. (1978). *Estudio sedimentológico y estratigráfico del Terciario continental de los Monegros*. Publicación nº 681. Institución Fernando el Católico (CSIC), Zaragoza.

Simón Gómez, J.L., Martínez Gil, J., Soriano Jiménez, M.A., Arlegui Crespo, L. y Caballero Burbano, J. (1998). *Estudio de riesgos naturales de los terrenos de la orla suroeste del suelo urbanizable*. Informe público Ayuntamiento de Zaragoza (Anexo 3.1. PGOU). <http://www.zaragoza.es/contenidos/urbanismo/pgouz/memoria/anejos/anejoo3/anejoo31.pdf>.

Simón, J.L., Soriano, Mª A., Pocoví, A., Arlegui, L.E., Casas, A.M., Liesa, C.L., Luzón, A., Pérez, A., Pueyo, Ó., Pueyo, E.L., Mochales, T., Gracia Abadías, J. y Ansón, D. (2009). Riesgo de subsidencia kárstica en áreas urbanas: el caso de Zaragoza. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 173-303-315. ■

Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 10 de noviembre de 2015 y aceptado definitivamente para su publicación el 20 de enero de 2016

ANAGLIFOS



PARES ESTEREOSCOPIOS

