
Análisis cartográfico de dolinas activas en el valle del Río Gállego y medición de tasas de subsidencia

Trabajo de fin de grado de Geología



Marta Ramón Pellejero

Director del trabajo de fin de grado: Francisco Gutiérrez

Índice

ABSTRACT	2
PLANTEAMIENTO.....	2
OBJETIVOS	3
INTRODUCCIÓN	3
SITUACIÓN GEOGRÁFICA.	6
SITUACIÓN GEOLÓGICA.	7
METODOLOGÍA.....	10
A) CARTOGRAFÍA E INVENTARIO DE DOLINAS	10
B) NIVELACIÓN.....	10
PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	12
A) CARTOGRAFÍA GEOMORFOLÓGICA.....	12
B) INVENTARIO DE DOLINAS.....	13
C)NIVELACIÓN.....	15
D)DAÑOS CAUSADOS	16
CONCLUSIONS.....	18
BIBLIOGRAFÍA	19

Abstract

This work analyses sinkholes and karstic subsidence in the outskirts of Zuera, (Gállego Valley, NE Spain), and the impacts that it produces on the human environment and which anthropogenic activities affect sinkholes formation. It also studies ground subsidence in a specific sinkhole using high-precision leveling.

The easiest way to prevent the damages related to karst subsidence is to identify the most hazardous areas through the production of a cartographic sinkhole inventory. Lithology and hydrodynamics are the main factors that control the formation of sinkholes and reactivation of previous ones. In the investigated area, groundwater dissolves gypsum and salts such as halite or glauberite and produces salt precipitates in wetlands located near Gállego River that function as discharge areas. The removal of subsurface materials by dissolution produces interstratal dissolution and the formation of sinkholes. The terrace deposits of the Gállego River also show paleosinkholes and thickenings related to past karstification.

Sinkhole activity damages linear infrastructures in the studied area such as the roads N-330 and A-23 and the industrial building “el Agrar”. Furthermore, it causes damages on field crops affected by the formation of sinkholes and fissures, especially when the farmers irrigate the fields.

Leveling performed along a 450 m long line in the Zuera sinkhole allowed us to characterise some spatial patterns of the deformation process and measure subsidence rates.

Planteamiento

Este trabajo se centra en el estudio de los riesgos kársticos y el impacto que producen sobre el medio natural y el antrópico. En esta memoria se presenta una introducción al riesgo kárstico, se describe el marco geográfico y geológico de la zona de estudio, la metodología empleada para la realización del trabajo, seguidamente se presentan y discuten los resultados y para acabar se extraen las conclusiones de este estudio.

En la introducción se definirá lo que es una dolina, determinando sus tipos y las condiciones geológicas, hidrológicas y climáticas que favorecen el desarrollo de este fenómeno kárstico. Además, se revisan de manera breve y concisa los impactos que producen las dolinas en España, en la Depresión del Ebro y en las cercanías de Zuera, donde se emplaza este estudio. Para concluir este apartado se incidirá en la importancia de llevar a cabo medidas para controlar el riesgo kárstico. Estas medidas incluyen la realización de cartografías e inventarios de dolinas, así como la monitorización de las dolinas activas. La nivelación, al ser un método que requiere de la instalación de puntos de medida y una dedicación de tiempo considerable, sólo se ha realizado en una de las dolinas de la zona de estudio, la Dolina de Zuera o “La Balsa” (Figura 1), llamada así por la gente del entorno debido a que se encuentra inundada. Asociadas a esta dolina aparecen grietas y dolinas de colapso de menor entidad. Se ha decidido llevar aplicar la técnica de la nivelación a esta dolina debido a su gran tamaño, su rápida subsidencia y por afectar a infraestructuras críticas como la carretera N-330 y la autovía A-23.



Figura 1: Dolina de Zuera, también llamada " La Balsa". Está formada por dos masas de agua y se encuentra junto a la N-330. Es una dolina activa y el hundimiento afecta a dicha infraestructura lineal y a la autovía contigua, la A-23.

Una vez concluida la introducción se procede a describir la metodología empleada para la realización de la cartografía y el inventario de dolinas, así como el procedimiento empleado para la nivelación. Tras haber expuesto la metodología se presentarán los datos recabados, especialmente el inventario cartográfico de dolinas que incluye tablas con información sobre cada una de las depresiones y un catálogo fotográfico. También se describirán los daños que producen las dolinas en la zona de estudio, así como los impactos que causa el ser humano en el sistema kárstico del área de estudio. Para finalizar este apartado se expondrán los datos medidos en las distintas campañas de nivelación mediante perfiles de deformación. Finalmente, se expondrán las conclusiones obtenidas en este estudio y la bibliografía empleada.

Objetivos

El objetivo principal del trabajo es llevar a cabo un inventario cartográfico de las dolinas, caracterizándolas y localizándolas geográficamente. Otro de los objetivos es realizar una cartografía geomorfológica para contextualizar el entorno en el que se ha desarrollado la karstificación. Además, se ha aplicado la nivelación de alta precisión para el análisis de la subsidencia que afecta a la dolina de Zuera. Por último, se ha generado una regresión que relaciona la magnitud y la frecuencia de las dolinas inventariadas en la zona de estudio.

Introducción

Las dolinas son depresiones cerradas con drenaje interno características del paisaje kárstico. Pueden presentar diversas morfologías y su diámetro y profundidad pueden alcanzar cientos de metros. La subsidencia se produce por tres mecanismos de forma individual o combinada: flexión, colapso y sufusión. (Figura 2) (Gutiérrez et al., 2008).

MAIN SINKHOLE TYPES			
MATERIAL	PROCESS		
	Sagging	Suffosion	Collapse
Cover	<p>Cover sagging sinkhole</p>	<p>Cover suffosion sinkhole</p>	<p>Cover collapse sinkhole</p>
Caprock	<p>Caprock sagging sinkhole</p>		<p>Caprock collapse sinkhole</p>
Bedrock	<p>Bedrock sagging sinkhole</p>		<p>Bedrock collapse sinkhole</p>

Figura 2: Principales tipos de dolinas atendiendo al material en el que se forman (cobertera, sustrato soluble y sustrato insoluble) y el mecanismo de subsidencia (flexión, sufusión y colapso). Los procesos de sufusión sólo se producen en materiales no consolidados.

En el sector central de la Depresión del Ebro se generan numerosas dolinas en zonas con depósitos aluviales cuaternarios, tanto pobremente consolidados como cementados, debido a la karstificación del sustrato evaporítico infrayacente. Este fenómeno geológico produce el asiento del terreno, pudiendo

causar daños importantes en estructuras humanas y pérdidas de vidas, especialmente cuando la subsidencia ocurre de manera súbita. (Desir et al., 2018).

Los sedimentos aluviales, en los que predominan gravas con una elevada permeabilidad, permiten la circulación del agua subterránea que disuelve las evaporitas tanto en el contacto entre el aluvial y el sustrato evaporítico como en el seno de este último (Benito et al., 2010). El transporte mecánico de las partículas y la subsidencia de la cobertera del aluvial pueden verse favorecidos por cambios en el nivel freático producidos por factores como variaciones en la recarga de los acuíferos, el caudal del río, el riego, o el bombeo del agua y la generación de conos de depresión. La disolución de las evaporitas está controlada por factores lito-estructurales como la composición litológica (halita, yeso y anhidrita) y su espesor, la presencia de unidades impermeables o la estructura, especialmente la presencia de planos de discontinuidad que son zonas preferentes para la circulación del agua. Además, el proceso de karstificación del yeso puede verse acentuado por la presencia de NaCl disuelto en el agua, pudiendo aumentar su solubilidad hasta 4 veces debido a la mayor fuerza iónica de la solución (efecto salino).

Con relación a las condiciones hidrológicas y climáticas, puede haber periodos con un mayor aporte de agua y una karstificación más intensa. Tradicionalmente, los fenómenos de subsidencia tanto antiguos como actuales identificados en los valles excavados en evaporitas Terciarias en el sector central de la Cuenca del Ebro se ha atribuido a la disolución del yeso. (Figura 3).



Figura 3: Estratos tabulares de yeso Terciario en la zona de estudio. No afloran en demasiadas zonas debido a que están cubiertos por depósitos de terrazas del Gállego compuestas por conglomerados, arenas, limos y arcillas.

Sin embargo, en estudios recientes basados en datos de sondeos, análisis hidroquímicos y la interpretación del paleokarst, se ha demostrado que la karstificación de sales altamente solubles como halita y glauberita juegan un papel determinante en los procesos de subsidencia (Benito et al., 1998).

España es el país europeo en el que se producen más pérdidas económicas relacionadas con la disolución de evaporitas. Esto se debe a que los afloramientos de rocas solubles representan aproximadamente un 30% de la superficie del país, de los cuales un 23% corresponden a carbonatos y un 7% a evaporitas. El mayor riesgo está asociado a algunos valles fluviales excavados en evaporitas terciarias en los que la vulnerabilidad y peligrosidad son altas. Ejemplos de estos valles serían el valle del Ebro en el entorno de Zaragoza, en valle del Jalón en Calatayud, los valles del Tajo y algunos de sus afluentes en el entorno de Madrid o en valle del Fluvià en Gerona (Gutiérrez et al., 2008a). Los valles que experimentan los procesos más graves de subsidencia son los excavados en formaciones evaporíticas con unidades salinas (halita, glauberita, sales potásicas). Los depósitos de terraza en estos valles presentan engrosamientos importantes debidos a procesos de subsidencia sinsedimentaria a gran escala y deformaciones asociadas a paleodolinas (Benito et al., 1998).

El sector central de la Depresión del Ebro es el área dentro de España con mayores pérdidas económicas relacionadas con la subsidencia por disolución de evaporitas (Galve et al., 2015). Estos procesos afectan tanto al valle del río Ebro como a sus afluentes: Gállego, Jalón y Huerva. La subsidencia sinsedimentaria también ha afectado a los rellenos valles de fondo plano denominados vales en la región (Gutiérrez y Arauzo, 1997). En el valle del Huerva la subsidencia afecta a la autovía Zaragoza-Valencia (N-330) y a las poblaciones de Cadrete, Cuarte y Santa Fe. Algunas edificaciones de Cadrete y Santa Fe han sido dañadas o incluso demolidas, incluyendo el convento de Santa Fe que fue construido en el siglo XIV, destruido por la subsidencia y reconstruido en el siglo XVIII. Actualmente ha sido abandonado por problemas de estabilidad atribuibles en parte a la subsidencia. También se han formado dolinas en depósitos de agua (Guerrero et al., 2004). En la ciudad de Zaragoza la subsidencia se produce principalmente en las afueras de la ciudad donde la cobertera aluvial es menos potente y alrededor del canal Imperial de Aragón. (Figura 4)



Figura 4: Dolina de colapso en la Depresión del Ebro, cerca de la Puebla de Alfindén, a las afueras de Zaragoza. Fotografía tomada por un dron en la asignatura de Riesgos Geológicos de la Universidad de Zaragoza.

En el barrio zaragozano de Valdespartera se identificó una gran depresión alargada que fue interpretada como un polje. En el entorno de Zaragoza las dolinas afectan actualmente a viviendas, polígonos industriales, carreteras, vías de ferrocarril y otros elementos humanos como campos de cultivo (Guerrero et al., 2004).

En la zona de Zuera, donde se ha realizado este trabajo, el impacto de las dolinas se hace patente en el pueblo abandonado de Puilatos. Este era un pueblo de colonización que fue construido en 1956 y tuvo que abandonarse en 1975 debido a los graves daños sufridos en las estructuras a causa de la disolución del sustrato. Los daños fueron tales que tuvo que ser demolido (Zarroca et al., 2016). Además, en la actualidad, en la zona de Zuera, hay infraestructuras afectadas por las dolinas como la carretera N-330, la autovía A-23 e incluso la línea de tren que atraviesa la zona y conecta con Huesca. También se producen daños en fábricas y campos de cultivos.

La subsidencia es un riesgo importante a tener en cuenta en la planificación del territorio y a la hora de construir estructuras. La manera más eficaz de evitar que se produzcan daños por subsidencia es evitar las zonas en las que hay actualmente dolinas y las más susceptibles a la formación nuevas dolinas. Por ello es necesario identificar dichas zonas mediante la elaboración de inventarios cartográficos de dolinas y de mapas de susceptibilidad y peligrosidad (Galve et al., 2015). Estos documentos permiten identificar las porciones del territorio en las que sería más recomendable ubicar una estructura atendiendo al riesgo de subsidencia. Es importante tener presente que los mapas de susceptibilidad y peligrosidad no indican con exactitud dónde se formarán dolinas, aunque muestran las zonas más y menos propensas a su formación o incluso la probabilidad de ocurrencia.

Es recomendable determinar cuáles de las dolinas cartografiadas son activas y obtener información de su cinemática: régimen de deformación (continúo, episódico o una combinación de ambos), tasa de subsidencia y variabilidad espacial del patrón de deformación, incluyendo los límites de la zona afectada por la dolina (Galve et al., 2015).

La monitorización consiste en la medición de desplazamientos del terreno. Con la monitorización se puede determinar el área afectada por el desplazamiento, el tipo de deformación, las tasas de subsidencia y sus patrones espacio-temporales. La monitorización puede llevarse a cabo usando técnicas sobre el terreno y con sensores remotos. Existen varias técnicas geodésicas aplicables a la monitorización de dolinas como el láser escáner, LiDAR (Light Detection and Ranging), DInSAR (Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry), GPS diferencial (Desir et al., 2018). La utilizada en este estudio es la nivelación.

La nivelación es la medición del desnivel entre distintos puntos situados sobre la superficie del terreno. Se realiza estableciendo una línea de nivelación que pase por la zona central de lo que se quiere medir, en el caso de este trabajo, una dolina. Después se colocan puntos a una distancia regular y se mide la diferencia de altura entre dichos puntos, obteniéndose, mediante la comparación de las medidas tomadas en distintas fechas, el perfil de subsidencia de la dolina. Esta técnica permite localizar con precisión los límites de las zonas afectadas por subsidencia y las estructuras de deformación asociadas a las mismas, analizar los patrones y mecanismos de deformación, medir con precisión tasas de subsidencia y su variabilidad espacio-temporal, así como estimar cambios volumétricos producidos por la subsidencia (Desir et al., 2018).

Situación geográfica.

La zona de estudio se emplaza en el tramo bajo del valle del río Gállego, 29 km al NNO de Zaragoza, en la Comunidad Autónoma de Aragón, al NE de la Península Ibérica (Figura 5). El río Gállego nace en los Pirineos y desemboca en el río Ebro cerca de la ciudad de Zaragoza.



Figura 5: Situación de la zona de estudio en la Península Ibérica. Se observa que se encuentra al NE de la misma, cerca de los Pirineos.

La zona de estudio tiene una superficie de 11,16 km² y se encuentra al Norte de la localidad de Zuera y del Polígono Industrial Llanos de la Estación y al Sur de la población de Ontinar de Salz. El área analizada está atravesada de Norte a Sur por la autovía A-23 y la carretera N-230. Está surcada por canales como la acequia Camarera, que tiene una dirección en general N-S y se encuentra en la parte O del área de estudio; el barranco de la Violada, que tiene una dirección similar a la de la autovía y el barranco de Valdeparadas, que se encuentra al Norte de la dolina de Zuera y tiene una dirección E-O.

En la zona se encuentra también el pueblo abandonado de Puilatos, 500 m al Norte de la Dolina de Zuera. (Figura 6)

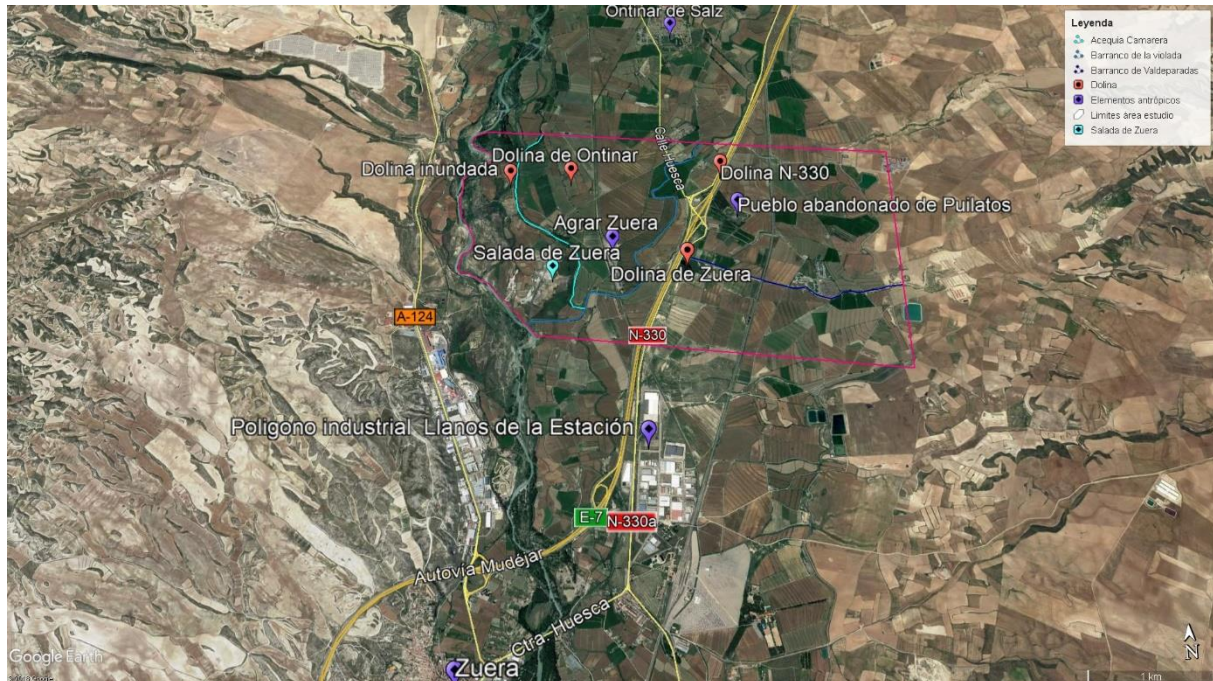


Figura 6: Zona de estudio al norte de la localidad de Zuera. Por el Oeste se haya limitada por el río Gállego. Tomada de Google Earth. Se han indicado las partes más significativas de la zona.: en color rojo se han indicado las dolinas de mayor entidad, en azul oscuro los elementos antrópicos de mayor importancia, en turquesa los elementos naturales destacables y en rosa la delimitación de la zona de estudio. Así mismo se han señalado en 3 tonos de azul las acequias y barrancos que se encuentran en la zona de estudio.

Situación geológica.

La zona de estudio se emplaza en el sector central de la cuenca cenozoica del Ebro. Los Pirineos son un orógeno alpino generado por colisión entre las placas Europea e Ibérica, y la cuenca del Ebro es su cuenca de antepaís meridional. En el Eoceno superior, tras la regresión del Priaboniense, la cuenca del Ebro dejó de estar ocupada por el mar y pasó a ser una cuenca endorreica rodeada de cadenas montañosas (Benito et al., 2010). En esta época se desarrollaron sistemas de abanicos aluviales relacionados distalmente con ambientes lacustres someros con sedimentación de evaporitas y carbonatos. Los sedimentos continentales que rellenan la cuenca son conglomerados y areniscas en los márgenes, pasando gradualmente a arcillas, margas, evaporitas y facies carbonatas hacia el depocentro de la cuenca (Benito et al., 1998). En los últimos 40 km del tramo bajo del río Gállego el valle se encaja en la formación Yesos de Zaragoza (Benito et al., 2010). Esta formación oligo-miocena está constituida por facies evaporíticas con sales (halita y glauberita) generalmente subhorizontales, y con diaclasas subverticales (Benito et al., 1998).

La formación Yesos de Zaragoza se divide a dos unidades litoestratigráficas: la Unidad Inferior y la Unidad Superior. (Benito et al., 1998).

La Unidad Inferior tiene un espesor de hasta 270 m y su límite superior en la zona de Zuera se encuentra alrededor de los 162 m bajo el nivel del mar, estando el fondo del valle del Gállego en esta zona a unos 300m sobre el nivel del mar. Esta unidad está compuesta por tres secuencias sedimentarias constituidas por un cuerpo inferior de arcillas con intercalaciones de anhidrita y caliza y un cuerpo superior de halita con intercalaciones de arcilla y anhidrita.

La Unidad Superior alcanza 600 m de espesor y está compuesta por una subunidad inferior de 140 m de arcillas margosas, una subunidad intermedia de 120 m de halita, cuyo límite superior se encuentra en 95 m s.n.m. en Zuera y una subunidad superior de anhidrita y yeso. (Figura 7). Las facies de esta unidad presentan variaciones laterales y verticales bruscas, por lo que no se sabe con precisión la distribución de facies en cada zona concreta. (Benito et al., 1998).

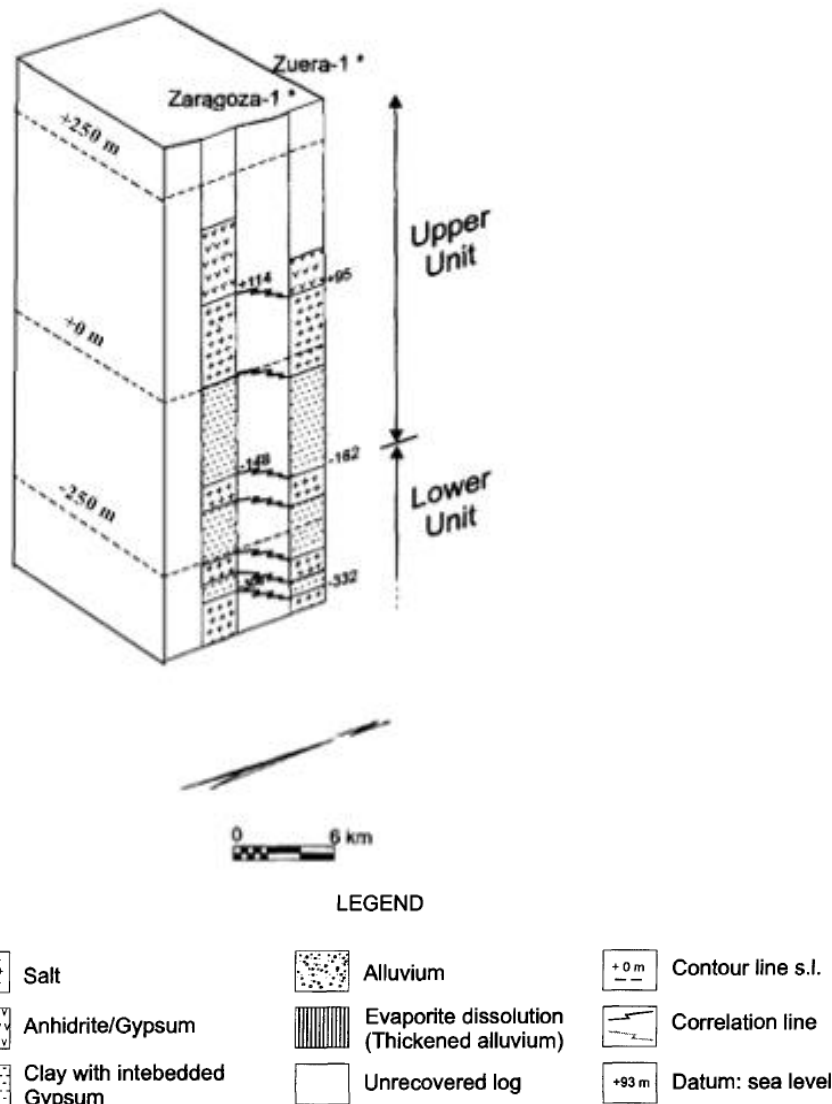


Figura 7: Columnas estratigráficas que muestran la Fm. Yesos de Zaragoza en Zuera y Zaragoza. Se representan las distintas litologías, el espesor de las unidades y una correlación entre ambas, así como el datum. Modificado de Benito et al., 1998 basado en Torrecusa y Klimowitx., 1990 y Esnaola et al., 1995.

En la dolina de Zuera se realizó un sondeo al Sur de la dolina que permitió conocer el sustrato evaporítico que aparece bajo ella (Figura 8). Con la realización de este sondeo se observó que la cobertera está constituida por 4 m de gravas cuaternarias, bajo las cuales aparecen 47 m de arcillas margosas oscuras. Estas últimas han sido interpretadas como el residuo insoluble producido por karstificación, el cual incluye: cuerpos de gravas cuaternarias de más de 2 m a 17 m bajo la superficie, intercaladas con el residuo kárstico, que se habrían depositado para rellenar los huecos formados por la karstificación; a 42 m de profundidad aparecen fragmentos de halita en las arcillas residuales y a partir de 51 m se encontraron estratos de centimétricos a decimétricos de halita. Estos resultados sugieren que la karstificación de esta zona se debe a la disolución de la halita (Zarroca et al., 2016).

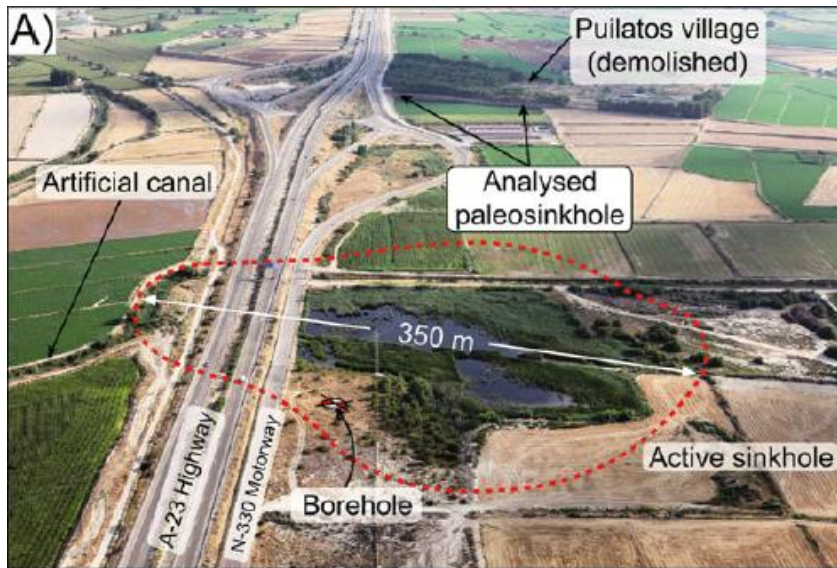


Figura 8: Localización del sondeo que se realizó junto a la dolina de Zuera. Así mismo, se muestran los elementos destacables del entorno de dicha dolina como la A-23, la N-330, el canal artificial en el que descarga parte del agua retenida en la dolina, y el pueblo abandonado de Puilatos.

Los depósitos de gravas cuaternarias encontrados en dicho sondeo se corresponderían con depósitos del río Gállego. El río Gállego es de tipo meandriforme, aunque en algunos tramos presenta características anastomosadas. Este río tiene un área de drenaje de 4.000 km² y discurre en dirección NNE-SSO. Las terrazas del Gállego son omnipresentes y muy continuas a lo largo del valle del Gállego, pudiendo llegar a encontrarse hasta 12 niveles. (Benito et al., 1998). En general las dolinas se desarrollan sobre los aluviales menos endurecidos y recientes. Estas son a su vez zonas con un nivel freático somero y que localmente actúan como áreas de descarga del flujo subterráneo. Esto se observa en la salada de Zuera en la que el nivel freático aflora formando unos humedales en los que precipitan las sales que han sido disueltas y transportadas por el flujo subterráneo (Figura 9).



Figura 9: Cristalización de los minerales disueltos por el flujo de agua subterránea que aflora en la salada de Zuera.

Algunos de estos depósitos de terraza aparecen engrosados a causa de la subsidencia sinsedimentaria causada por la disolución del sustrato evaporítico (Gutiérrez y Gutiérrez, 1996). Estos depósitos engrosados rellenan cubetas formadas por disolución con un estructura en cuenca y abanicos de capas en sus márgenes. Debido a estos engrosamientos en las terrazas, las unidades sedimentarias correspondientes a distintos niveles de terraza pueden estar superpuestas y estar limitadas por discordancias angulares o paraconformidades. Además, en la cobertera aluvial se pueden observar evidencias de deformación frágil y dúctil, tanto sinsedimentarias como postsedimentarias (Gutiérrez y

Gutiérrez, 1996). En algunos lugares concretos las deformaciones postsedimentarias aparecen superpuestas sobre las estructuras sinsedimentaria, mostrando reactivación de la subsidencia. Los sedimentos que han sufrido deformación tras su depósito por colapso muestran fallas normales cilíndricas con reorientación de los clastos en los márgenes. En las zonas centrales de los colapsos el hundimiento de los sedimentos produce compresión en la horizontal dando lugar a pliegues estrechos y fallas inversas antitéticas (Benito et al., 1998).

La zona por la que discurre el río Gállego tiene un clima semi-árido con una precipitación media anual de 300 mm. La distribución de las lluvias es irregular, con un aumento de las mismas en primavera y otoño. El río Gállego recibe gran parte de sus aportes de la cabecera de la cuenca en los Pirineos. Sin embargo, gran parte de la recarga del acuífero aluvial procede del riego de los cultivos, lo que explica que los niveles más altos del nivel freático se registran al final del verano, coincidiendo con el nivel más bajo del Gállego. Esto sugiere que el agua de riego que se introduce en el acuífero aluvial es un factor importante en el desarrollo de las dolinas, ya que puede actuar como catalizador de los procesos de karstificación y subsidencia (Gutiérrez et al., 2007).

Metodología

A) Cartografía e inventario de dolinas

El primer paso para la realización de una cartografía de dolinas es estudiar las fotografías aéreas de la zona. Con el comparador histórico del IGN se pueden identificar las dolinas y acotar su edad mediante la comparación de fotografías aéreas tomadas en distintos años. Además, la búsqueda de dolinas con las fotografías aéreas permite identificar dolinas que han sido cubiertas por los agricultores para poder cultivar. Tanto las dolinas actualmente observables como las obliteradas por rellenos antrópicos se marcan en una ortoimagen de la zona de estudio para comprobar su existencia en campo y obtener datos cualitativos y cuantitativos de las mismas (forma, diámetro mayor, profundidad, mecanismo de subsidencia, etc.). Estos datos se recogen en un cuaderno de campo para posteriormente elaborar un inventario de dolinas. Para su geolocalización, se ha empleado un GPS y la aplicación desarrollada por el IGN denominada “Mapas de España”. Así mismo, se han fotografiado todas las dolinas para incorporar estas imágenes al inventario y se marcan en el mapa para después delimitarlas en la cartografía realizada con el programa ArcGIS (Anexo III) y, posteriormente, llevar a cabo un análisis de la densidad de dolinas en el área de estudio. El inventario de dolinas permite hacer una primera evaluación sobre la susceptibilidad a las dolinas en la zona. No obstante, hay que tener en cuenta que generalmente se obtienen estimaciones optimistas, debido a que algunas dolinas podrían no haberse incorporado al inventario.

B) Nivelación

Antes de aplicar la nivelación es conveniente realizar una cartografía de detalle para determinar en qué lugar es más adecuado instalar las líneas de nivelación, prestando atención a la inclinación del terreno, fracturas, grietas y otras evidencias de deformación. Las líneas de nivelación se emplazan preferentemente atravesando la totalidad de la dolina por su zona central y se deben alargar más allá de la zona donde se observa la deformación (Desir et al., 2018) para poder comparar las variaciones verticales con respecto a zonas estables. La línea de nivelación elegida para este estudio se encuentra en el margen Este de la N-330 y tiene 450 m de longitud (Figura 10).



Figura 10: Línea en la que se realizó la nivelación en la Dolina de Zuera marcada en color naranja. Se emplaza en la N-330 y tiene una longitud de 450m.

En ella se instalan puntos de nivelación que se corresponden con 45 clavos separados regularmente cada 10m (Figura 11). Una vez comprobado el correcto estado de los clavos se procede a la medición, la cual se realiza empleando un nivel digital (Leica DNA03) y una barra invar con código de barras de 2 m de altura (Leica GPCL2). (Figura 12).

Para ello se coloca el nivel en el punto medio entre dos clavos y la barra con código sobre los clavos, realizando medidas de frente y de espalda en clavos consecutivos y de ida y vuelta para toda la línea. Los valores obtenidos se consideran correctos si las medidas de ida y vuelta son similares, aceptando una discrepancia de hasta 0.3 mm. El error kilométrico se calcula con la diferencia entre los sumatorios de los datos de ida y vuelta dividida por la raíz cuadrada de la longitud de la línea de en kilómetros. La nivelación se llevó a cabo en 4 campañas: Mayo de 2017, Octubre de 2017, Marzo de 2018 y Junio de 2018. (Desir et al.,2018). La autora de este trabajo participó en las campañas de Marzo y Junio de 2018.



Figura 11:Clavo empleado para la medición de la subsidencia en mal estado debido a la aparición de una grieta en el asfalto por efecto de la subsidencia de la dolina.



Figura 12:A la derecha se observa el nivel digital (Leica DNA03) al margen de la carretera N-330 realizando una medición empleando la barra codificada que se encuentra a la izquierda de la imagen, situada verticalmente sobre un clavo.

Presentación y discusión de los resultados obtenidos

A) Cartografía geomorfológica

La cartografía geomorfológica de la zona muestra que los modelados que dominan en la zona son el fluvial, el kárstico, el estructural y el poligénico.

Dentro del modelado fluvial destacan las terrazas que tienen mayor extensión en la margen Este del río Gállego, mientras que en el Oeste tienen menor entidad y aparecen todas menos la T5, que sólo se encuentra en la zona Norte de la orilla Este. Todas las terrazas tienen, al igual que el río, una dirección N-S. Aparecen hasta 5 niveles de terrazas, siendo la T1 la llanura de inundación. La llanura de inundación está constituida por limos, arcillas y arenas. Esta litología es la misma que aparece en los meandros abandonados, que se encuentran al Norte y al Sur, pero este último tienen menor tamaño. El resto de las terrazas están dominadas por gravas, con cantos de rocas ígneas y metamórficas procedentes del Pirineo.

Otro tipo de modelado fluvial que aparece son los valles de fondo plano o vales. Son abundantes en toda la zona, aunque presentan mayor tamaño en la zona Este de la cartografía realizada, apareciendo un valle de fondo plano de gran tamaño en el NE.

Además, aparecen escasos barrancos de incisión lineal. Este tipo de modelado se desarrolla en los glacis y cerca de las plataformas estructurales. También se forman escasos conos de deyección en la margen Oeste del Gállego, cuando se desconfinan los barrancos de incisión lineal en las terrazas.

En cuanto al modelado poligénico destacan los glacis acumulativos que son de mayor tamaño en la orilla Este del Gállego. Además de los grandes glacis que ocupan enormes extensiones aparecen algunos de menor entidad en las zonas en las que termina el relieve en graderío y comienza en valle de fondo plano. La mayoría de los glacis comienzan en las zonas altas y terminan en el valle del Huerva o tienen una dirección similar, aunque hay algunos, como los situados junto a los valles de fondo plano, que tienen dirección N-S, comenzando en las plataformas estructurales y terminando en los valles de fondo plano.

En el margen Este sólo aparece un glacis erosivo, mientras que en el Oeste aparecen algunos más, aunque todos de ellos son de escaso tamaño en comparación con los acumulativos.

El modelado estructural está representado por las plataformas estructurales, relieves en graderío y crestas. Las plataformas estructurales se encuentran en los extremos NO y al E de la hoja y se caracterizan por ser superficies planas de gran altura, que en la zona Este dan lugar a extensos relieves en graderío que apenas aparecen en la otra orilla del Gállego. Las plataformas estructurales situadas en la orilla Oeste se han producido en yesos, mientras que en la otra orilla se forman en calizas y margas. Las crestas son escasas y se encuentran asociadas a las plataformas estructurales. Además, aparece una cuesta en el extremo Norte, buzando hacia el Sur.

Por último, aparece modelado kárstico cuyo mayor representante son las dolinas y del que no se va a entrar en detalle en este apartado debido a que este tema se trata en el resto del documento.

B) Inventario de dolinas

El inventario de dolinas que se ha realizado se encuentra en los Anexos e incluye información de 51 dolinas que se han identificado en campo. El Anexo I incluye una tabla en la que se recoge la información más importante de dichas dolinas: coordenadas en UTM (Huso 30N), mecanismo de subsidencia, cronología relativa, eje mayor (m), profundidad (m), contexto geomorfológico, usos del suelo y características de la dolina.

Las coordenadas se han obtenido mediante la aplicación “Mapas de España” del IGN con la que, al situarte sobre un punto del mapa, te permite marcar la localización y te indica las coordenadas de la misma. El mecanismo de subsidencia se establece tomando como referencia la Figura 2, aunque en campo el criterio utilizado para determinar el tipo de subsidencia es la presencia de planos de rotura, que indicarían que el tipo de subsidencia es colapso. En algunas dolinas no se ha podido definir debido a que se encontraban inundadas al haber capturado el nivel freático o porque no estaba claro.

La cronología relativa de las dolinas se ha obtenido mediante la comparación fotos aéreas realizadas por distintos vuelos: el de 1956-1957, el OLISTAT de 1997-1998, el SIGPAC de 1997-2003, PNOA 2006, PNOA 2009, PNOA 2012 y PNOA 2015. En la tabla se indica el año de la primera fotografía en la que se detecta la dolina. Las dolinas de pequeño tamaño no han podido ser observadas en las fotos aéreas ni en las imágenes de satélite y, por tanto, no se ha podido establecer su cronología.

En algunas de las dolinas que se encuentran inundadas no ha sido posible medir la profundidad máxima que presentan. El contexto geomorfológico se ha determinado a partir del mapa geomorfológico que se ha realizado en la zona.

La información de usos del suelo se ha obtenido del visor Idearagón o por el uso de suelo observado en campo, que en su mayoría es agrícola.

A partir de los datos de diámetro de las dolinas se puede analizar las relaciones entre el tamaño y la frecuencia acumulada de las dolinas (Gráfico 1). Para ello se toman las medidas de diámetro de las

dolinas y se ordenan estos valores de mayor tamaño a menor tamaño. A continuación, se calcula la probabilidad relativa de que una dolina alcance o supere un determinado tamaño.

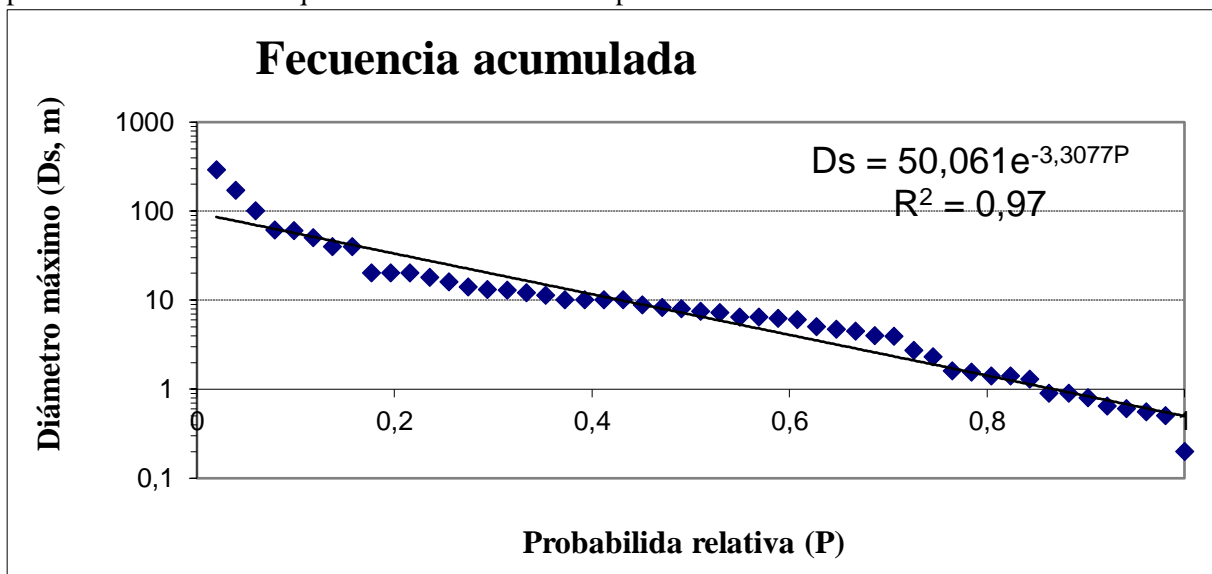


Gráfico 1: Relación magnitud frecuencia entre las dolinas del inventario. En el eje de ordenadas se representa el diámetro mayor de las dolinas en escala logarítmica y en abscisas la probabilidad relativa.

El gráfico obtenido se ajusta a una función lineal con un alto coeficiente de correlación. Esta línea de tendencia a la que se ajustan los datos indica que hay mayor probabilidad de que se produzcan dolinas de menor tamaño que de que se formen dolinas de gran tamaño.

Además, se ha realizado un diagrama de densidad de Kernel creando 10 categorías mediante el programa ArcGIS (Figura 13). Dentro de estas categorías se clasifican como zonas de muy alta densidad aquellas que tienen un valor entre 23,27 y 13,60 dolinas/m². Las zonas de densidad alta tienen valores de entre 13,60 y 5,11, las áreas de densidad media están entre 5,11 y 2,10. Aquellas que tienen valores de 2,10 a 0,82 se consideran zonas con densidad baja y por debajo de 0,82 son zonas de densidad muy baja. Se ha tomado un valor de search radius de 600m. Este tipo de diagrama no tiene en cuenta el tamaño de las dolinas, tan sólo su número. Para realizar este diagrama se han determinado los centroides de las dolinas cartografiadas en campo, en este caso 41 dolinas. Sólo sean realizado los centroides de aquellas dolinas con suficiente tamaño para ser observadas en la fotografía aérea o en las imágenes de satélite.

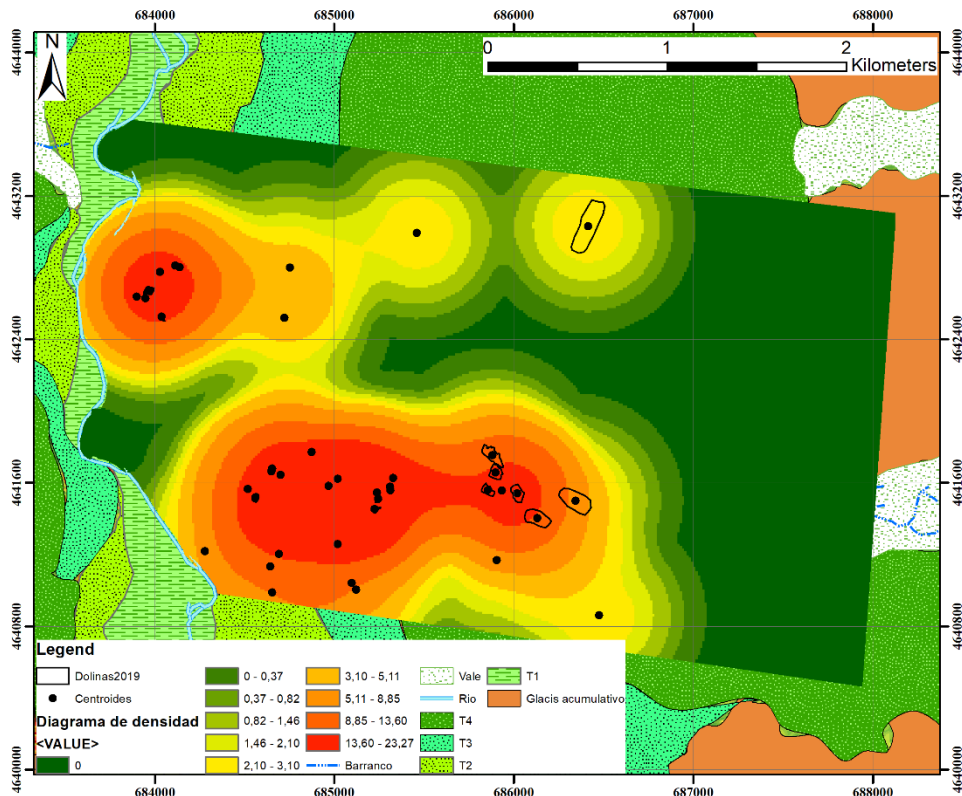


Figura 13: Mapa de densidad de dolinas dentro del área de estudio.

De acuerdo con el diagrama obtenido, se observa la presencia de dos bandas de mayor densidad de dolinas, ambas con dirección E-O. En el extremo O de dichas bandas se encuentra la salada de Zuera, que actúa como zona de descarga del flujo subterráneo que disuelve las sales presentes en el sustrato. Esto podría indicar el recorrido que realiza el flujo de agua subterránea dentro de la zona de estudio, que iría en dirección E-O, desembocando en la salada. Además, las zonas de mayor densidad se encuentran cerca de los canales y barrancos. Esto puede deberse a que la formación de dolinas se ve favorecida por la presencia de agua.

C) Nivelación

Los datos obtenidos de 4 nivelaciones en la Dolina de Zuera se han representado en forma de desplazamiento vertical acumulado (Gráfico 2), tomando los datos de Mayo de 2017 como datum para luego observar la subsidencia que se ha producido cuando se llevaron a cabo las siguientes mediciones. Las mediciones se llevaron a cabo cada 6 meses excepto en las dos últimas, que se realizaron con un espaciado temporal de 3 meses.

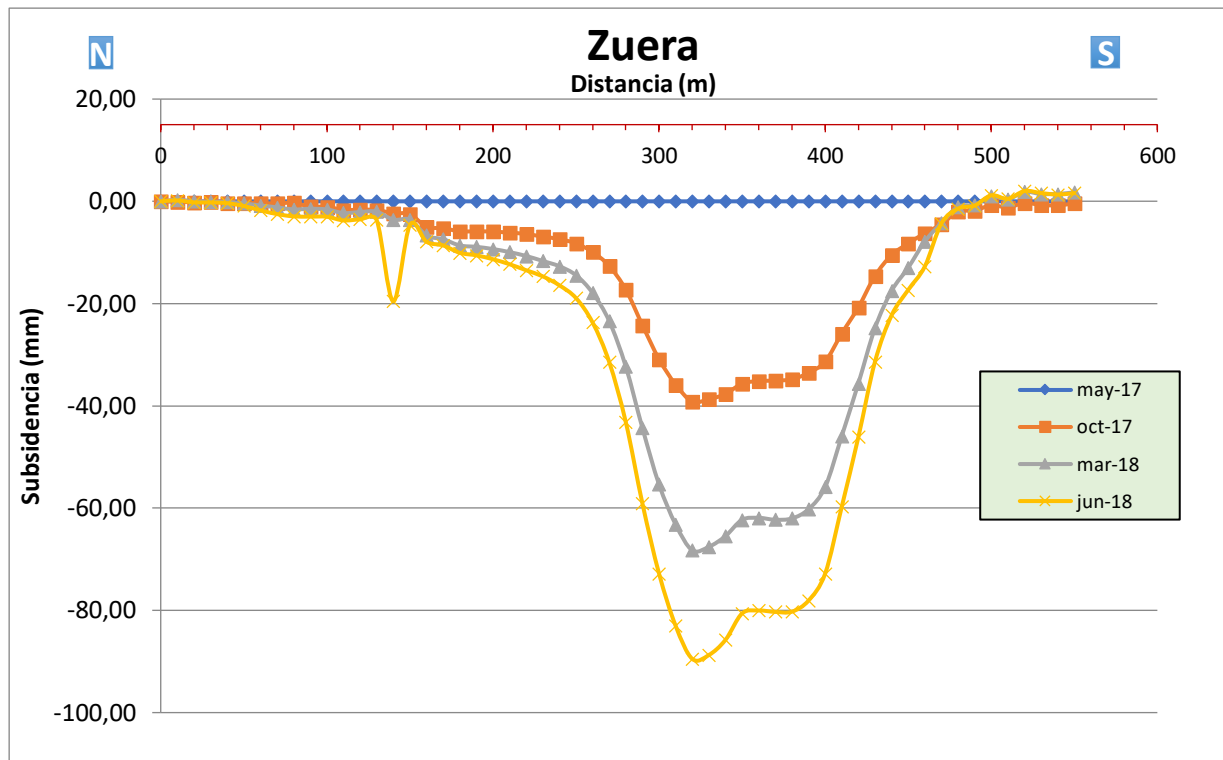


Gráfico 2: Resultados obtenidos de 4 nivelaciones realizadas en la dolina de Zuera. Se observa un dato anómalo que se podría corresponder con el hundimiento de un clavo por la formación de una grieta bajo el mismo.

El gráfico registra subsidencia en 410 m de los 450 que conforman la línea de nivelación. La subsidencia es irregular, encontrándose una zona de menor subsidencia en la zona Norte y una importante subsidencia en la zona central de la dolina. La mayor tasa de subsidencia se registró en la campaña de Junio de 2018, en el punto situado a 320 m. Dicha subsidencia tiene un valor de -89,2mm, con respecto al valor de datum. La subsidencia media acumulada tiene un valor de -25,21 mm y como el periodo total de nivelación es de 417 días se obtiene que la tasa de subsidencia sería aproximadamente -22,06 mm/año. Este valor de subsidencia es bastante alto, lo que indica que el hundimiento de la dolina es rápido. La subsidencia sigue patrones fijos y se extiende hacia el Norte, donde se obtienen valores de subsidencia más altos debido a la presencia de madrigueras de conejos que favorecen el hundimiento. El mecanismo de subsidencia sería de flexión, aunque en la parte central dicho mecanismo se combinaría con colapso.

Teniendo en cuenta que la superficie del área de estudio es de 33.000m² (Desir et al., 2018) y con el dato obtenido de tasa de subsidencia (-0,22 m/año), se calcula el cambio volumétrico en la superficie causado por la subsidencia. Este cambio puede ser calculado a partir del producto de ambos. Se obtiene un valor de 7.260m³/año.

D) Daños causados

Los daños más importantes que se han producido en el área de estudio debido al riesgo de subsidencia son el abandono del pueblo de Puilatós y la degradación de las infraestructuras lineares. Otro daño significativo sería la formación de dolinas en los campos de cultivo.

Tras haber cartografiado una zona de campos de cultivo cercana a la Dolina de Zuera y sólo haber encontrado una muy ligera subsidencia en los campos (Dolina 27), los agricultores regaron a manta, es decir, cubrieron toda la superficie de los campos de agua. Poco tiempo después de que se produjera la irrigación los agricultores se pusieron en contacto con la autora del trabajo para alertarle de la aparición de enormes grietas y dolinas en la misma zona en la que antes apenas se habían encontrado signos de subsidencia. (Figura 14). El riego implica el aporte de más cantidad del agua al subsuelo, en el que se

infiltra. Esta infiltración y el posterior desplazamiento de la masa de agua hacia zonas de menor cota, como el río Gállego o la salada de Zuera, suponen la disolución del sustrato evaporítico y, consecuentemente, el aumento de la peligrosidad por factores antrópicos.



Figura 14: Grietas formadas por el riego. Se observa sus grandes dimensiones y su continuidad a lo largo de varios campos de cultivo.

Estas nuevas grietas llegan a medir 46 m de longitud, 3 m de anchura y 0,6 m de profundidad. Esto puede provocar que la maquinaria de los agricultores caiga en su interior, produciéndose importantes daños materiales para los propietarios del campo. Así mismo, la formación de estas grietas o de las dolinas, suponen para el propietario del terreno tener que rellenarlas para poder cultivar. El relleno de las dolinas y grietas supone un coste económico importante para los agricultores y, además esta medida no descarta la posibilidad de que se vuelvan a formar dolinas o grietas. Actualmente, los agricultores de la zona están sopesando la posibilidad de cambiar el tipo de cultivo a uno de secano para evitar la formación de fenómenos kársticos. De hecho, algunos de los campos situados en el entorno de la dolina de la Balsa han sido abandonados por la formación de grietas y colapsos asociados a las mismas.

La karstificación también afecta a las infraestructuras lineales como la A-23 y N-330 (Figura 16). El daño principal es el hundimiento de dichas infraestructuras y la formación de grietas. La solución que se aplica es asfaltar de nuevo la calzada para que los vehículos sigan pudiendo transitar por ella.



Figura 15: Dolina en la N-330 al Norte de Puilatós. Se aprecian las grietas formadas en el asfalto por el hundimiento de la dolina.

Además, en la zona de estudio se emplaza el Agrar, que es una fábrica en la que en el pasado ya se han producido daños en su estructura debido a la formación de dolinas bajo la misma.

El riesgo más importante de la zona se detecta en un oleoducto y gaseoducto que atraviesa la salada de Zuera. La formación de una dolina podría llegar a suponer la rotura del conducto que transporta estos materiales, suponiendo un daño grave para el ecosistema de la zona y pérdidas económicas para los propietarios.

Conclusions

The main conclusion obtained of the geomorphological cartography is that sinkholes are more often found in the lower terraces of the Gállego River. This could be explained knowing that the water flows through evaporitic layers, which have lower mechanic resistance, transporting the dissolved salts from the evaporitic substratum (interstratal karst) from high zones of the valley to the lowest. This could be corroborated by the present of saline wetland, located in T2. Not only the lithology has an important impact on the formation of sinkholes but also the hydrodynamics. When the farmers irrigate their fields the infiltration and dissolution of the evaporitic layers increases a lot. Consequently, new sinkholes and fissures are formed quickly with larger dimensions than most of the other sinkholes of the area. Moreover, the presence of artificial channels also affects the location of the sinkholes which are usually placed near these channels. The fast generation of sinkholes is caused by the fact that the evaporitic substratum is composed by other salts, apart from gypsum, which have higher solubility than gypsum or anhydrite. This hypothesis is corroborated with the results obtained by the borehole carried out in the study area which demonstrated that there were halite layers beneath the Quaternary deposits.

The underground water flow runs from East to West and springs at saline wetlands since crystals of halite and gypsum are formed at this wetland.

Secondly, the results obtained from the leveling allows to characterize the subsidence of Zuera sinkhole. The main mechanism of subsidence is sagging. However, the centre of the sinkholes shows sharp lateral changes in the deformation rate suggestive of collapse faults. It has a subsidence rate of $-22,06$ mm/year and an annual volumetric change in the land surface related to subsidence of around $7.260\text{m}^3/\text{year}$. This shows that Zuera sinkhole is an active doline which has very fast subsidence and could produce important damages on human structures.

To sum up, karst risk produces important damages on human structures and it is essential to study this hazard in order to reduce its impact on humans and infrastructures. Cheap methods such as the production of detailed cartographic sinkhole inventories could significantly contribute to reduce the damage.

Bibliografía

Benito G, Pérez-González A, Gutiérrez F, Machado MJ. (1998): River response to Quaternary subsidence due to evaporite solution (Gállego River, Ebro Basin, Spain). *Geomorphology* 22: 243-263.

Benito G, Sancho C, Peña JL, Machado MJ, Rhodes EJ (2010): Large-scale karst subsidence and accelerated fluvial aggradation during MIS6 in NE Spain: climatic and palaeohydrological implications. *Quaternary Science Reviews* 29 : 2694-2704.

Desir, G., Gutiérrez, F., Merino, J., Carbonel, D., Benito-Calvo, A., Guerrero, J., Fabregat, I. (2018): Rapid subsidence in damaging sinkholes: Measurement by high-precision leveling and the role of salt dissolution. *Geomorphology*, 303, 393-409.

Eснаоla, J.M., Santos, J.A., Gil, C., Marqués, L.A. (1995): Memoria y Mapa Geológico de España, 1:50,000. Alagón (354).ITGE, Madrid, 46 pp.

Galve, J.P., Castañeda, C., Gutiérrez, F., Herrera, G. (2015). Assessing sinkhole activity in the Ebro Valley mantled evaporite karst using advanced DInSAR. *Geomorphology*, 229, 30-44.

Guerrero, J., Gutiérrez, F., Lucha, P. (2004): Paleosubsidence and active subsidence due to evaporite dissolution in the Zaragoza area (Huerva River valley, NE Spain): processes, spatial distribution and protection measures for transport routes. *Eng. Geol*,72, 309-329.

Gutiérrez, M., Gutiérrez, F. (1996): Geomorphology of the Tertiary gypsum formations in the Ebro Depression (Spain). *Geoderma* 87, 1–29.

Gutiérrez, F., Arauzo, T. (1997): Subsistencia kárstica sinsedimentaria en un sistema aluvial efímero: El Barranco de Torrecilla. Depresión del Ebro, Zaragoza. *Cuadernos de Geología Ibérica* 22, 349–372.

Gutiérrez, F., Guerrero, J., Lucha, P., Gutiérrez, F. (2008a): A genetic classification of sinkholes illustrated from evaporite paleokarst exposures in Spain. *Environ. Geol.* 53, 993–1006.

Zarroca, M., Comas, X., Gutiérrez, F., Carbonel, D., Linares, R., Roqué, C., Mozaffari, M., Guerrero, J., Pellicer, X. (2016): The application of GPR and ERI in combination with exposure logging and retrodeformation analysis to characterize sinkholes and reconstruct their impact on fluvial sedimentation. Gállego Valley, NE Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42, 1049-1064.