

POTENCIAL FRÍO DE LOS CAMPOS DE DOLINAS DEL CALAR DEL MUNDO Y CAMPOS DE HERNÁN PELEA – CABRILLA (SIERRA DEL SEGURA)

Cold potential of the sinkhole's fields of Mundo and Hernán Pelea plateau (Sierra of Segura, Spain)

David Espín Sánchez^{1*}, Jorge Olcina Cantos²

¹Departamento de Geografía, Universidad de Murcia, Murcia, 30001, España.

²Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física, Universidad
de Alicante, San Vicente del Raspeig, 03690, España.

Identificador ORCID de los autores y e-mail

David Espín Sánchez: <https://orcid.org/0000-0003-4807-5450>. E-mail: david.espin1@um.es

Jorge Olcina Cantos: <https://orcid.org/0000-0002-4846-8126>. E-mail: jorge.olcina@ua.es *Autor corresponsal: david.espin1@um.es

Recibido: 09-01-2025. **Aceptado:** 16-06-2025. **Fecha de publicación on-line:** 24-09-2025

Citation/Cómo citar este artículo: Espín Sánchez, D., Olcina Cantos, J., (2025). Potencial frío de los campos de dolinas del Calar del Mundo y Campos de Hernán Pelea – Cabrilla (Sierra del Segura). *Pirineos*, 180 e088. <https://doi.org/10.3989/pirineos.2025.180.372>

RESUMEN: Los Campos de Hernán Pelea, Calar de la Cabrilla y Sierra Seca (Jaén), así como el Calar del Mundo (Albacete), constituyen dos de los principales calares o plataformas kársticas de la Península Ibérica. Su elevada altitud media (1500-1700 m s.n.m.), el importante exokarst muy evolucionado con multitud de campos de dolinas, y las extensas superficies de ambas áreas, propician que ambos lugares se conviertan en importantes polos fríos del interior del sureste peninsular. El análisis topográfico realizado en alta resolución ha permitido llevar a cabo el principal objetivo del análisis, el de identificar todos los cerramientos topográficos de ambos calares y los principales campos de dolinas (704 en el Calar del Mundo distribuidos en tres campos principales, y 3.650 en Hernán Pelea, Cabrilla y Sierra Seca, distribuidos en un total de 24 campos). Se trata de lugares donde la deposición de aire frío durante madrugadas estables genera las temperaturas más bajas de cualquier forma terrestre. A través de diferentes parámetros topográficos (altura de piscina, Sky view Factor -SvF-, o el volumen de los cerramientos), se ha obtenido un índice termo-orográfico para poder medir el potencial frío durante madrugadas estables, determinando que la dolina de la Nava del Polvo (Sierra de la Cabrilla) y Pozo Romero (Calar del Mundo) son las que presentan un mayor potencial frío. En estas dolinas se han registrado valores térmicos mínimos de -28,8 y -25,4 °C respectivamente el 12 de enero de 2021.

PALABRAS CLAVE: karst; dolinas; estabilidad térmica; piscina de aire frío; factor de visión de cielo visible.

ABSTRACT: The Hernán Pelea, Calar de la Cabrilla, and Sierra Seca (Jaén), as well as Calar del Mundo (Albacete), constitute two of the main karst platforms of the Iberian Peninsula. Their high average altitude (1.500-1.700 m a.s.l.), the significant, highly evolved exokarst with a multitude of sinkhole fields, and the extensive surfaces of both areas, make both locations important cold air pools in the interior of the southeast of the Iberian Peninsula. The high-resolution topographic analysis has allowed us to achieve the main objective of the analysis, which was to identify all the topographic enclosures of both calars and the main sinkhole fields (704 in Calar del Mundo distributed in three main fields, and 3,650 in Hernán Pelea, Cabrilla and Sierra Seca, distributed in a total of 24 fields). These are places where the deposition of cold air during stable early mornings generates the lowest temperatures of any land form. Through different topographic parameters (pool height, Sky View Factor -SvF-, or the volume of the enclosures), a thermo-orographic index has been obtained to measure the cold potential during stable early mornings, determining that the Nava del Polvo sinkholes (Sierra de la Cabrilla) and Pozo Romero (Calar del Mundo) have the highest cold potential. In these sinkholes, minimum thermal values of -28.8 and -25.4°C respectively have been recorded on 12 January 2021, highlighting the general nighttime cold in the study area, and in some sinkholes in the Sierra de la Cabrilla and the central core of Hernán Pelea.

KEYWORDS: karst; sinkholes; thermal stability; cold air pool; *Sky view Factor*.

Introducción

Las dolinas son depresiones kársticas elementales originadas principalmente por procesos de meteorización química de rocas carbonáticas como calizas, dolomías y mármoles. Pueden encontrarse en el campo de manera aislada o en grupos, a los que habitualmente se les denomina campos de dolinas. García Prieto (1991) define un campo de dolinas como “un área de extensión variable, de varios km², en cuyo interior se observa una agrupación preferencial de dolinas con respecto a las áreas circundantes”. En la mayoría de las ocasiones, presentan límites netos representados por un brusco descenso de la densidad de dolinas, y su génesis se explica entonces atendiendo a una serie de factores primarios y secundarios comunes que favorecen su desarrollo dentro de un macizo kárstico, mientras que, en otros casos, resulta más complicado establecer dichos límites.

García Prieto (1991) efectúa una diferenciación entre campos de dolinas a partir de clasificaciones ya aplicadas por otros autores al estudio de dolinas concretas o de clasificaciones más globales según los tipos de karst, basadas en las condiciones climáticas dominantes en cada área y las fases de evolución morfogenética de los macizos. Para una correcta clasificación, es preciso considerar distintos factores que intervienen en un karst, además de un conjunto de criterios objetivos y sistemáticos, que permitan diferenciar los principales tipos de sistemas kársticos dentro de una región e identificar las “tendencias morfológicas secundarias” que deriven de ellos. Este criterio hace posible contemplar un mayor número de procesos genéticos a la hora de abordar el estudio de un campo de dolinas en el contexto de un sistema kárstico más amplio. De acuerdo con dicho criterio, son numerosos los trabajos que tratan de catalogar este tipo de depresiones kársticas atendiendo a sus características específicas, morfogenéticas y morfométricas en relación con el sistema kárstico general que los engloban. García Prieto (1991), por ejemplo, propone una clasificación de los campos de dolinas, basada en parámetros estrictamente morfométricos. Dicho autor aplica tal criterio en el estudio de cinco campos representativos del modelo kárstico más comúnmente desarrollado durante el Plioceno en el sector central de la Cordillera Ibérica. Entre los parámetros utilizados por este autor figuran el área total (km²), el área dolinizada (%), el número total de dolinas, la densidad de dolinas por km², la distancia media al vecino más próximo, la distancia media al vecino más próximo de igual rango, el índice de distribución espacial, la profundidad, la elongación, el producto de simetría y el área de las dolinas.

En diversos estudios se definen las dolinas como formas diagnósticas de karst (Sweeting, 1972; Ford y Williams, 1989; Summerfield, 1991; Sauro, 2003). Basándose en las investigaciones pioneras de Cvijić (1893), Morais y Soriano (2017) sugieren clasificar las dolinas en función de su morfología y procesos genéticos, aunque reconocen que, en determinadas ocasiones, resulta muy complicado establecer el origen de sus formas, ya que éstas dependen de factores geológicos, climáticos y geomorfológicos muy diversos (Beck, 1986; Jennings, 1987). La metodología comúnmente empleada en su estudio se basa en análisis de tipo morfométrico, combinados con la aplicación de métodos físicos, a partir de los que se determina la geometría interna y los flujos hídricos de dichas formaciones kársticas (Valois et al., 2011; Land, 2013; Carbonel et al., 2014).

Los métodos geofísicos incluyen técnicas de prospección geoelectrica, geotérmica y sísmica, de gravimetría y magnetometría, entre otras (Reynolds, 2011). Palmquist (1979) y Bondesan et al. (1992) aplicaron este tipo de métodos para comprobar la validez de los índices morfométricos utilizados en el estudio de las

dolinas como indicadores de los procesos kársticos responsables de su génesis. Otros autores (Singh et al., 2004; Srinivas et al., 2012) los han empleado para intentar demostrar su utilidad en el estudio de los flujos hídricos subterráneos en medios estratificados. No obstante, a diferencia de García Prieto (1991), dichos autores utilizan una menor cantidad de parámetros para el análisis de las dolinas: longitud, anchura, área, perímetro, orientación, índice de circularidad, y la relación entre la longitud y la anchura.

Una CAP es una capa de aire estable y estratificada que se encuentra confinada en el fondo de un valle o cuenca. Las CAP se forman con frecuencia durante las horas nocturnas bajo cielo despejado y condiciones de vientos sinópticos débiles, destruyéndose por convección después del amanecer (Arduini et al., 2020).

La diferencia entre las temperaturas en el fondo y fuera de la depresión puede ser de varios grados (Smith et al., 2010; Jiménez et al., 2015), con diferencias de hasta 20°C en depresiones cerradas (Iijima y Shinoda, 2000). Numerosos autores han determinado que los elementos topográficos subsidentes registran las temperaturas más bajas durante los fenómenos de ITN (Whiteman et al., 2001; Clements et al., 2003; Lundquist et al., 2008; Renon, 2011).

Las depresiones topográficamente cerradas (sin desagüe superficial) son los enclaves que más frío acumulan durante las madrugadas estables (Dorninger, 2016), y, por tanto, donde se registran las temperaturas mínimas más bajas del planeta. Las denominadas piscinas de aire frío cerradas (*cold air pools* o CAP) son depresiones confinadas topográficamente que ofrecen las mejores condiciones para la acumulación de aire frío. Desde comienzos del siglo XX, los estudios de CAP e inversiones térmicas nocturnas han sido ampliamente analizados en dolinas de los principales sistemas montañosos planetarios, destacando los pioneros en los Alpes austriacos (valle del Gstettner), donde ya se registraron temperaturas mínimas de -50°C en fondos de dolinas (Schmidt, 1930). Peter Sinks (Utah), en las Montañas Rocosas de EE.UU, mantiene la temperatura mínima extrema récord de esta región (-56°C), registrando la segunda temperatura más fría de Estados Unidos (Pope y Brough, 1996).

Los factores topográficos son esenciales para las condiciones de temperatura en una depresión cerrada o cuenca. El tamaño (volumen), la forma y la altitud son los parámetros vitales. La masa de aire predominante determina en gran medida el potencial de mínimos de baja temperatura. El balance de energía superficial, incluido el efecto de la capa de nieve, la humedad y la velocidad del viento, son otros parámetros cruciales (Dorninger, 2016).

Whiteman et al. (2004) y Dorninger (2016) muestran en sus investigaciones una comparativa de perfiles térmicos en diferentes tipos de dolinas vecinas, en el que el factor de visión de cielo visible o “Sky view Factor” (SvF) proporciona la mejor explicación para temperaturas muy bajas.

Litschauer (1962) monitorizó un total de 12 dolinas (incluido el Grünloch, Austria), de diferentes tamaños con termógrafos y termómetros de mínimas, y estudió la influencia del volumen, la presión atmosférica superficial y las inclinaciones de las pendientes en la superficie mediante curvas de temperatura. El tamaño y la forma de la dolina, o, en definitiva, la geometría de esta, son factores determinantes para el mínimo, el ciclo diurno y la fuerza de inversión en la dolina. El factor de visión del cielo tiene en cuenta la elevación del horizonte y, por tanto, la reducción de la radiación en todo el semiespacio. Whiteman et al. (2004) compara las curvas de temperatura de cinco cerramientos topográficos de diferentes formas en las inmediaciones del Grünloch, en dolinas de muy diferentes geometrías. Concluyen que el factor de vista del cielo (SvF) es la característica topográfica clave de una dolina.

La geología de la Sierra de Segura ha sido estudiada en sus diversos tramos por Jerez Mir (1971), Foucault (1971), López Garrido (1971), Dabrio (1973) y Rodríguez Estrella (1979). Sus relieves se insertan en el dominio del Prebético Interno, que comprende materiales carbonatados cretácicos, cuya estructura es de pliegues y fallas con desarrollo local de escamas y grandes fallas de desgarre. En la Cordillera Bética Ibérica, y más concretamente en la Sierra de Segura, cabe mencionar como referentes previos los trabajos de López Limia (1986 y 1987) sobre la zona kárstica del Pinar Negro (Jaén), donde se han reconocido más de 1.300 formas exokárticas, con tasas de densidad de hasta 80 dolinas por km², y gran heterogeneidad de tamaños. López Limia y López Bermúdez (1985) analizan los tipos de lapiaz en un karst mediterráneo de montaña en la Sierra de Segura, así como importante es el análisis de la morfología kárstica efectuada en el sector oriental del Prebético andaluz (López Limia y López Bermúdez, 1998). En el Calar del Mundo destacan los análisis del karst de López Bermúdez (1974), y el estudio geo-hidroespeleológico (Rodríguez Estrella y Ballesta Sánchez, 1999).

Los campos de dolinas son el elemento más representativo de los paisajes kársticos del Prebético andaluz (López Limia, 1986, 1987; López Bermúdez y López Limia, 1989). Las condiciones climáticas, a menudo

periglaciares, y las características morfoestructurales son, generalmente, los factores más favorables para su génesis y desarrollo. El tamaño, la forma y la altitud son los parámetros vitales. La masa de aire predominante determina en gran medida el potencial de mínimos de baja temperatura. El balance de energía superficial, incluido el efecto de la capa de nieve, la humedad y la velocidad del viento, son otros parámetros cruciales.

El principal objetivo del artículo es la delimitación y contabilización del número de cerramientos topográficos y de los campos de dolinas en los calares de los Campos de Hernán Pelea y Calar del Mundo. A través de la utilización de técnicas en Sistemas de Información Geográfica (SIG) se caracterizan su geolocalización, altura de piscina, SvF, altitud del fondo y del desagüe topográfico más bajo, así como el volumen. Además, se caracteriza desde el punto de vista geológico y litológico, densidad de dolinización cada uno de los campos de dolinas identificados.

Los anteriores parámetros analizados serán una fuente de información esencial para el segundo gran objetivo del análisis, el de la proposición de un índice termo-orográfico (ITO) que caracterizará cada dolina identificada con el potencial frío para el registro de temperaturas mínimas durante madrugadas estables. Se propone una cartografía con el índice ITO para cada área de estudio.

2. Área de estudio

El área de estudio se incluye en el amplio dominio geoestructural de la Cordillera Bética, y dentro de ella, en la Zona Prebética. Formaría parte del Prebético Interno, según Dabrio (1973) y del Prebético Meridional, según Rodríguez Estrella (1979). Dentro del Prebético Externo aparecen los dos ámbitos geográficos de estudio: Campos de Hernán Pelea, Cabrilla y Sierra Seca (Jaén), y Calar del Mundo (Albacete).

Los Campos de Hernán Pelea constituyen una plataforma kárstica en la Sierra del Segura, flanqueada por las Sierras de la Guillimona, Sagra y Cazorla. Pertenecen en su totalidad a la provincia de Jaén (al este), y en concreto al municipio de Santiago de la Espada-Pontones, (Andalucía, España). Los Campos de Hernán Pelea, en sentido estricto, abarcan una superficie de 75,5 km² con una altitud media máxima de 1.698 m s.n.m., donde se eleva el pico Banderillas (1.993 m s.n.m.), con una altitud mínima de 1.519 m s. n. m. Los campos de dolinas del núcleo de la plataforma kárstica integran una superficie de 42,8 km². El área de estudio constituye una amplia cuenca semiendorreica, desarrollada en las cabeceras de las cuencas hidrográficas del Guadalquivir y del Segura (Figura 1).

La mayoría de los campos de dolinas de Hernán Pelea se han desarrollado sobre dolomías blanquecinas del Albiense Superior y del Cenomaniense. Dicha formación, originada por procesos de dolomitización epigenéticos, alcanza un mayor desarrollo en la Sierra de la Cabrilla, donde ocupa casi toda su superficie. Tiene un espesor medio variable entre 140 y 200 m y se compone de dolomías muy cristalinas, de color gris claro, dispuestas en bancos gruesos de estructura tabular a masiva (Dabrio, 1973; López Limia y López Bermúdez, 1985).

Los Campos de Hernán Pelea, Cabrilla y Sierra Seca presentan un clima de tipo oceánico-mediterráneo de verano suave (Csb de Köppen), con una pluviometría media anual estimada en 1.150 mm en las zonas más elevadas del calar (Gómez Zotano et al., 2016). López Limia y López Bermúdez (1985) ya la definieron como un tipo de área morfoclimática húmeda templado-fría y continentalizada, con influencias atlánticas y mediterráneas, donde las precipitaciones oscilan entre los 800 y 1.300 mm y la temperatura media anual alrededor de 9 °C. La precipitación media anual del periodo de referencia (1981-2010), ronda los 800 y 900 l m⁻² en los observatorios de AEMET de los municipios cercanos de Pontones y Santiago de la Espada (Jaén).

Tal y como se ha podido corroborar recientemente (Espín Sánchez, 2021), el campo central de la altiplanicie de Hernán Pelea, así como la Sierra de la Cabrilla, son dos de los ámbitos geográficos más fríos de la Península Ibérica, con registros de temperaturas mínimas de -28,8 °C en la Nava de los Troncos y -25,4 °C en Don Fernando (12 de enero de 2021) (Espín Sánchez et al., 2021). Estos factores propician que la Sierra de Segura, y concretamente el ámbito de estudio, sea un tipo de karst pluvio-nival (Eslava Ramirez et al., 2000).

El Calar del Mundo se encuentra enclavado geológicamente dentro de la Cordillera Bética, en la Zona Prebética y más concretamente en el dominio paleogeográfico del Prebético Interno; precisamente el borde septentrional del acuífero coincide con el límite entre el Prebético Externo y el Interno (Rodríguez Estrella y Ballesta Sánchez, 1979). Desde el punto de vista estructural, la sierra del Calar del Mundo constituye un macropliegue de unos 23 km de largo y 5-6 km de ancho, con estructura de sinclinorio. Este macizo carbonático presenta un karst de extraordinario desarrollo y riqueza en formas. Está constituido por una potente

secuencia de materiales esencialmente carbonáticos, del Cretácico superior, de unos 700 m de espesor, que se dispone sobre las margas y arenas de facies Utrillas (Rico y Rubio, 1997). La geomorfología, como en el Calar del Espino, se caracteriza por un relieve invertido, en cuyas cumbres se desarrolla una altiplanicie kárstica (Moral Martos, 2005).

El Calar del Mundo es el segundo ámbito geográfico con mayor densidad de dolinas de la Península Ibérica, sólo por detrás de los Campos de Hernán Pelea, en la Sierra de Segura. De entre las formas kársticas superficiales del Calar destacan las dolinas, que hacia la parte alta de la sierra tienen mayores dimensiones, uvalas (producto de la unión de varias dolinas), algunos poljes y campos de lapieaces. Finalmente, el tipo de clima es muy parecido al encontrado en Hernán Pelea (Csb de Köppen), con una pluviometría media anual estimada en 1.000 mm en las zonas más elevadas del calar del Mundo.

3. Datos y métodos

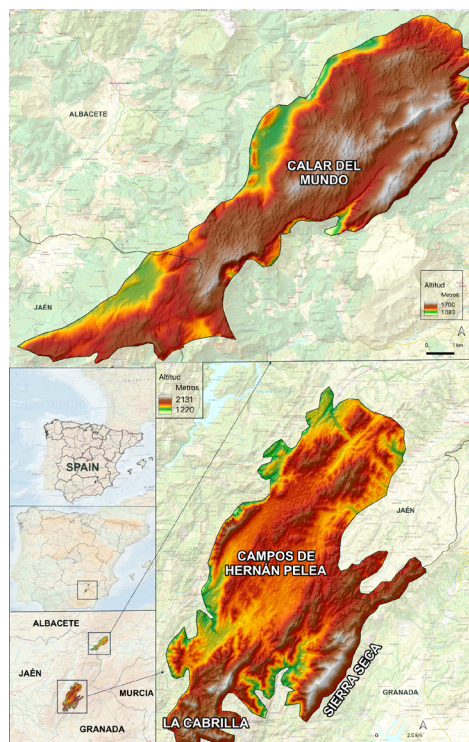
3.1 Identificación de los cerramientos topográficos

La identificación de los cerramientos topográficos ha sido calculado partiendo de la base del del Modelo Digital de Elevación (DEM) del Instituto Geográfico Nacional de España (IGN), concretamente el DEM con paso de malla de 2 m (MDT02). En total se han descargado y analizado 12 hojas del MDT02 a través del software QGIS 3.34.1 y del “System for Automated Geoscientific Analyses” (SAGA 8.4.0).

La Figura 1 muestra la excelente resolución espacial del área de estudio. La justificación en la elección de una resolución espacial de 2 m radica en una mejor aproximación a la identificación y delimitación de los cerramientos topográficos. El análisis topográfico se ha efectuado a través de SAGA 8.4.0, utilizando como base la composición DEM (MDT02) de cada una de las áreas de estudio. El análisis realizado ha servido para la identificación de los cerramientos topográficos, el cálculo del *Sky view Factor* (SvF) o porción de cielo visible, cálculo de la altitud del fondo del cerramiento, la superficie y el volumen, y para el posterior cálculo del índice ITO.

Figura 1. Área de estudio, con la altimetría del Calar del Mundo y el conjunto de los Campos de Hernán Pelea, Sierra Seca y La Cabrilla.

Figure 1. Study area with the altimetry of Calar del Mundo and the set of the Campos de Hernán Pelea, Sierra Seca and La Cabrilla.



3.1.1. *Altura de piscina, profundidad de la depresión, o cerramiento topográfico*

Se trata de la diferencia de altura entre el punto más bajo de la depresión y el punto de desbordamiento o cierre más bajo. La identificación de las depresiones topográficas cerradas sin desagüe ha sido realizada a través del algoritmo desarrollado por Planchon y Darboux (2001) en el software SAGA, a través de la herramienta de análisis del terreno “Fill Sinks” o relleno de “sumideros” o dolinas. La profundidad de una dolina está estrechamente relacionada con el potencial de temperaturas mínimas extremas (Dorminger, 2016).

El método es innovador porque, en lugar de rellenar gradualmente las depresiones, primero “inunda” la superficie con una gruesa capa de agua y luego “elimina” el exceso de agua. La primera opción se utiliza para el cálculo de la capacidad de almacenamiento de depresiones y la segunda para la extracción de la red de drenaje. Se aplica la Eq. 1, $W(c)$ alcanza su valor mínimo, por lo que $W(c) = W_f(c)$. En consecuencia, la altura de la celda c ya no se modificará:

$$Z(c) > W(n) + e(c, n) > Z(c) = Z(c) \text{ (Eq. 1)}$$

La Eq. 2 trata el caso opuesto. Cuando $Z(c)$ es menor que $W(n)$, $W(c)$ puede reducirse hasta $W(n) + 8(c, n)$:

$$W(c) > W(n) + e(c, n) > Z(c) = W(n) + e(c, n) \text{ (Eq. 2)}$$

3.1.2 “Sky view Factor” o porción de cielo visible

Se trata de uno de los factores más relevantes en el análisis de las temperaturas frías extremas en el interior de cerramientos topográficos (Marks y Dozier, 1979). Whiteman et al. (2004) muestran en su análisis, en el que se comparan las curvas de temperatura en cinco depresiones vecinas y de formas muy diferentes, que un factor de visión del cielo alto proporciona la mejor explicación para temperaturas muy baja. En cielos despejados y con aire con escasa carga higrométrica, la radiación de onda larga es mínima y menos importante que la radiación de onda larga de la superficie de la tierra. El balance de radiación en el fondo de un valle es óptimo para la formación de piscinas de aire frío cuando las laderas circundantes son lo más planas posible y las montañas no son demasiado altas. El SvF es una medida que se puede calcular de forma continuada para cada punto de la superficie terrestre a través del software SAGA, gracias a los algoritmos desarrollados por Oke (2000).

El SvF se puede calcular como una función de los parámetros del terreno (Eq. 3) derivados de un DEM según Dozier y Frew (1990).

$$s_f = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [\cos \alpha \sin^2 H_\Phi + \sin \alpha \cos(\Phi - \psi_s) \cdot (H_\Phi - \sin H_\Phi \cos H_\Phi)] d\Phi \text{ (Eq. 3)}$$

s_f es el factor de visión del cielo para una ubicación con pendiente α y acimut ψ_s . Para el cálculo, la ecuación integral se transformó en una suma de valores medios para 32 sectores de acimut equidistantes. Es la dirección media de cada sector numerado desde el sur en sentido antihorario. H es el ángulo cenital con el horizonte local para la dirección. Por su parte, el resto de variables analizadas para el cálculo del potencial frío de los cerramientos topográficos es llevado a cabo a través de QGIS: superficie y volumen del cerramiento topográfico, altitud y georreferenciación.

3.1.3. *Volumen de la piscina de aire frío*

Las piscinas de aire frío de mayor dimensión, junto a la profundidad de piscina, son las que registran las temperaturas mínimas absolutas más bajas. Esta vez es más determinante, pues se tiene en cuenta la altura del cerramiento. A pesar de ello, cerramientos de menor volumen pueden registrar temperaturas mínimas más bajas, aunque no suele ser habitual (Whiteman et al., 2004).

3.1.4. Altitud del cerramiento topográfico

Una depresión o cerramiento topográfico a mayor altitud será potencialmente más fría. Deben mencionarse dos fenómenos en este contexto. Con el aumento de la altitud, la velocidad del viento aumenta y la probabilidad de que una piscina de aire frío se mezcle turbulentamente aumenta. Este hecho reduce el número de casos con condiciones óptimas (Eckart et al., 2008). Dorninger (2016) concluye que, en la dolina de Scheichenspitze, a 2.384 m s.n.m, no se produjo una sola noche de radiación completamente libre de problemas en el invierno de 2007/2008, y, sin embargo, el 2 de enero de 2008 se registró una temperatura mínima absoluta de -48,4 °C.

La delimitación de los cerramientos topográficos naturales ha sido llevada a cabo excluyendo todos aquellos elementos artificiales o antrópicos que pudieran existir en el área de estudio, aunque, por lo general, al tratarse de ámbitos geográficos poco antropizados, han sido mínimos (embalses, presas, azudes, vías de comunicación que han generado una depresión en el terreno, minas a cielo abierto, vertederos...). Para ello se ha utilizado la función intersección de QGIS con la base cartográfica de IBERPIX del mapa topográfico nacional y las ortofotos del PNOA de máxima actualidad (IGN). Una vez delimitadas todas las geoformas naturales, se han filtrado todas aquellas con una altura de piscina igual o superior a 2 m.

Para la extracción de los datos de georreferenciación (X,Y), altitud (Z), altura de piscina y *Sky view Factor* (SvF), han sido extraídos los píxeles para cada una de las geoformas altitudinales naturales superior a 2 m de altura de piscina. Finalmente, se ha calculado la superficie de cada cerramiento topográfico con la función “medir” de QGIS, para establecer el volumen en función de la altura de la piscina.

3.2 Índice termo-orográfico

Además de las características meteorológicas (estabilidad atmosférica, cielo despejado, capa de nieve fresca, masa de aire), también hay una disposición estática dada por el modelado topográfico en el descenso de la temperatura nocturna en el interior de los cerramientos topográficos. Dichos factores geomorfológicos son claves para el análisis de la deposición de aire frío nocturno, especialmente en las depresiones de terreno cerrado sin escorrentía sobre el suelo.

Para la creación del índice termo-orográfico (ITO) se han tenido en cuenta cuatro variables ponderadas donde se tiene en cuenta los datos resultantes de los cerramientos topográficos identificados (Tabla 1):

$$ITO = ((AP * 35) + (SvF * 30) + (Z * 30) + (V * 5)) / 100 \text{ (Eq. 4)}$$

Tabla 1. Umbrales ponderados de los parámetros utilizados en el índice ITO.

Table 1. Weighted thresholds of the parameters used in the ITO index.

	AP (m)	V (hm ³)	Z (m)	SvF (0-1)
10	35	100	2.000	>0,98
9	30	50	1.900	0,98 / 0,97
8	27,5	10	1.800	0,97 / 0,95
7	25	2	1.700	0,95 / 0,92
6	22,5	1	1.600	0,92 / 0,90
5	20	0,8	1.500	0,90 / 0,85
4	15	0,6	1.400	0,85 / 0,82
3	10	0,4	1.300	0,82 / 0,80
2	5	0,1	1.200	0,80 / 0,75
1	0,0	0,0	1000	< 0,75

Donde: AP (altura de la piscina en metros), SvF (*Sky view Factor*, factor adimensional 0-1), Z (altitud en metros), V (volumen en hm³).

En ese sentido, y atendiendo a las conclusiones aportadas por Whiteman et al., (2004) y Dorninger (2016), se le otorga una mayor ponderación a la altura de piscina (30%), seguido de la altitud y el *Sky view factor* (25%). Entre los tres factores aglutinan un peso específico del 95%.

4. Resultados

4.1 Características de los campos de dolinas en el Calar del Mundo (Albacete)

En la plataforma kárstica del Mundo, una vez realizado el análisis topográfico, se han identificado un total de 704 depresiones o cerramientos topográficos con una altura de piscina igual o superior a 2 m (Tabla 2). La gran mayoría se corresponden con dolinas y uvalas, con la aparición de algún polje o sistema endorreico (cuencas cerradas sin salida fluvial de gran extensión superficial). La densidad media alcanza las 10,6 dolinas por km², aunque la distribución no es homogénea a lo largo del calar (Figura 2). Estas dolinas no aparecen de forma aleatoria, sino que se observa que están alineadas según fracturas como ya definieron Rodríguez Estrella y Ballesta Sánchez (1999).

Tabla 2. Resumen de los principales campos de dolinas y sus características en el Calar del Mundo.

Table 2. Summary of the main sinkhole fields and their characteristics in Calar del Mundo.

ID	Nombre del campo	Nº	Altitud mín. (m s.n.m)	Altitud máx. (m s.n.m)	Densidad (dolinas / km ²)	Geología (litología y edad)
CD1	Las Cruces - Coto de las Fábricas	144	1.302	1.598	30,1 (4,79 km ²)	Calizas del Senoniense, y dolomías del Turoniense.
CD2	Viboreros	171	1.456	1.657	31,5 (5,44 km ²)	Calizas estratificadas del Senoniense, y Turoniense.
CD3	Torca de los Tejos – Cuerda Canto	143	1.505	1.623	46,0 (3,11 km ²)	Calizas estratificadas del Senoniense.
	Resto de cerramientos	43				
	Total de cerramientos	704			10,6	

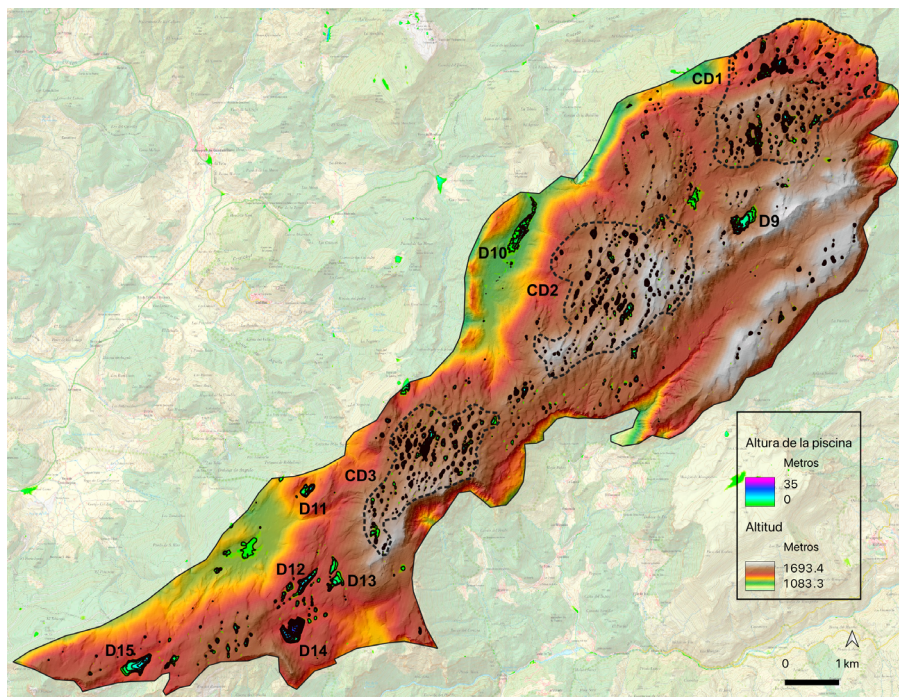


Figura 2. Calar del Mundo con los tres campos de dolinas principales y la nomenclatura del resto de dolinas importantes en el área de estudio (Tabla 3).

Figure 2. Calar del Mundo with the three main sinkhole fields, and the nomenclature of the rest of the important sinkholes in the study area (Table 3).

En el Calar del Mundo se han identificado tres grandes agrupaciones o campos de dolinas, debido principalmente a la densidad y ubicación de las mismas, al tratarse de un área de estudio relativamente homogénea desde el punto de vista geológico y litológico. La más septentrional, con 144 dolinas, la central, con el mayor número de depresiones (171) y la más meridional con un total de 143. Entre los tres campos agrupan el 65,1% de las dolinas de la plataforma kárstica.

CD1 Campo de dolinas “Las Cruces – Coto de las Fábricas”, ubicado en el sector noroccidental del calar del Mundo, caracterizado por presentar dos niveles altitudinales diferentes. El más septentrional, con dolinas de mayor magnitud, como la del Coto de las Fábricas, con altitudes entre 1.410 y 1.460 m s.n.m. Y el sector de “Las Cruces”, ubicado a una mayor altitud (1.510 a 1.595 m). Entre ambos sectores albergan un total de 144 cerramientos topográficos en una extensión de 4,8 km², lo que equivale a una densidad media de 30,1 dolinas por km². En este sector aparecen las dolinas de mayor magnitud del área de estudio (Tabla 2). Se trata de un campo que ha sido moldeado en calizas estratificadas de color gris claro a beige del Senoniense (Cretácico superior). En el flanco más oriental afloran dolomías beige de color marrón oscuro del Turoniense, debido al proceso de dismantelamiento de las calizas del Senoniense, expuestas en relieves algo más prominentes del flanco este del sinclinal, como consecuencia de la desnivelación a causa de una fractura (Figura 3).

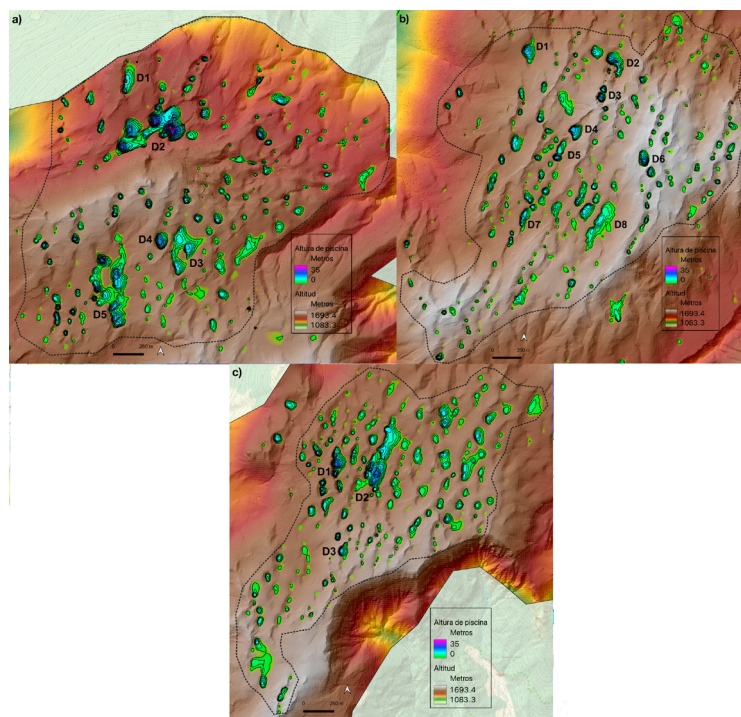


Figura 3. Calar del Mundo, con los tres campos de dolinas principales, y la nomenclatura del resto de dolinas importantes en el área de estudio: a) Las Cruces – Coto de las Fábricas, b) Viboreros, y c) Torca de los Tejos – Cuerda Canto.

Figure 3. Calar del Mundo with the three main sinkhole fields, and the nomenclature of the rest of the important sinkholes in the study area: a) Las Cruces – Coto de las Fábricas, b) Viboreros, and c) Torca de los Tejos – Cuerda Canto.

CD2. Campo de dolinas de “Viboreros”, ubicado en el sector central del calar, en el nodo intermunicipal de Riopar, Cotillas y Tus (Albacete). Se trata de un ámbito con altitudes comprendidas entre 1.500 y las más elevadas de hasta 1.630 m s.n.m junto al Cerro Viboreros (1.667 m s.n.m). El total de dolinas identificadas asciende a 171 en una superficie de 5,4 km² (Figura 4). El promedio de este campo llega a las 31,5 dolinas por km². Se caracterizan por presentar bastante homogeneidad, sin ninguna depresión que sobresalga especialmente del resto. El campo de Viboreros aparece del mismo modo sobre calizas estratificadas de color gris claro a beige del Senoniense (Cretácico superior). En el septentional y noroccidental afloran dolomías de color beige a marrón oscuro del Turoniense, siguiendo el mismo patrón del CD1.

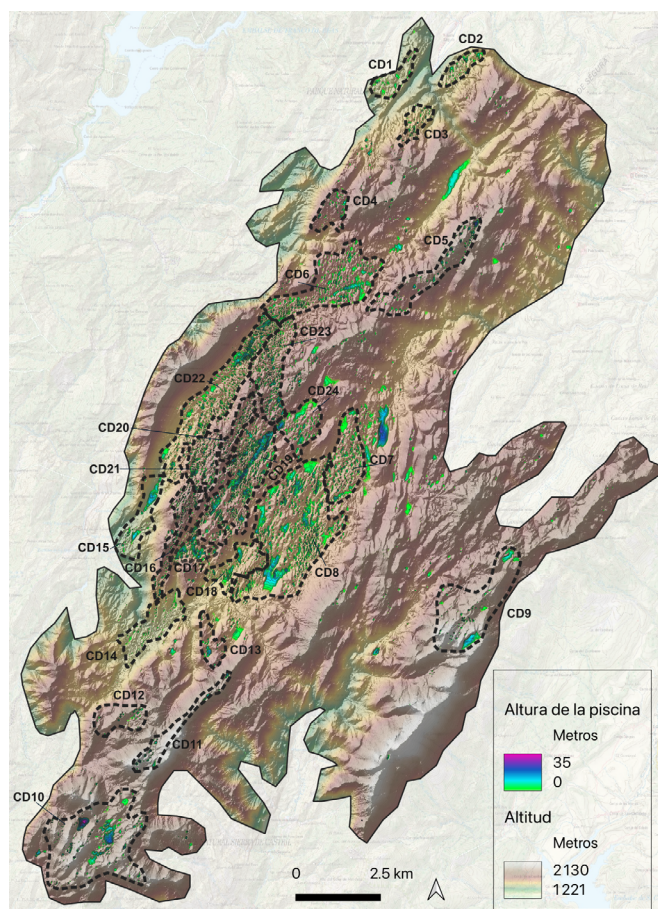


Figura 4. Campos de Hernán Pelea, Cabrilla y Sierra Seca, con los cerramientos topográficos y los campos de dolinas delimitados.
 Figure 4. *Hernán Pelea, Cabrilla and Sierra Seca fields, with the topographic enclosures and the sinkhole fields delimited.*

CD3. Campo de dolinas “Torca de los Tejos – Cuerda Canto”, ubicado en el sector centro-suroccidental del calar, alberga un total de 143 dolinas distribuidas entre 1.505 y 1.623 m s.n.m de altitud La extensión de 3.1 km² da lugar a una densidad de 46,0 dolinas por km², la más elevada del área de estudio. (Figura 5) El campo de dolinas se caracteriza por presentar una morfología de las dolinas bastante homogénea en su mayor parte, con tan sólo 2 uvalas de mayor extensión y altura de piscina. El resto se trata de dolinas circulares, alineadas en sentido SO-NE, siguiendo las líneas de fracturas del calar. A diferencia de los campos de dolinas D1 y D2, el de la Torca de los Tejos – Cuerda Canto presenta exclusivamente materiales del Senoniense, por lo que esta zona del calar (sector más meridional) presenta un menor desmantelamiento de las calizas estratificadas en la parte central del sinclinal.

La mayor uvala del campo de dolinas es D2, con una altura de piscina que alcanza los 20 m, y un volumen de casi 1 hm³. Aunque está lejos en potencial frío de las mayores dolinas del área de estudio (ITO de 5,7), es uno de los cerramientos más importantes del sector central del Calar del Mundo.

Fuera de los tres campos de dolinas descritos anteriormente, aparecen otros cerramientos topográficos más aislados con una importancia notable. Se trata de algunos poljes y grandes dolinas que presentan unos de los valores ITO más elevados del área de estudio. Entre los más sobresalientes destacan la Cañada de las Yeguas (1.526 m s.n.m) y Arroyo de los Mojones (1.255 m s.n.m) con 0,9 y 1,3 hm³ respectivamente, aunque también aparece un tercero en importancia en el extremo suroccidental (polje de La Laguna). Las dimensiones son 0,6 y 1,2 km de largo, por lo que según la clasificación de Cvijic (1918), al no superar una longitud de 2 km., no se trataría técnicamente de un polje, a pesar de que sus características presentan dicha morfología. Se trata de poljes inundados recurrentemente a una altitud media ampliamente superior a los 1.000 m s.n.m que presentan los poljes típicamente mediterráneos. Según López Bermúdez, (1974) tienen su origen en una fosa tectónica.

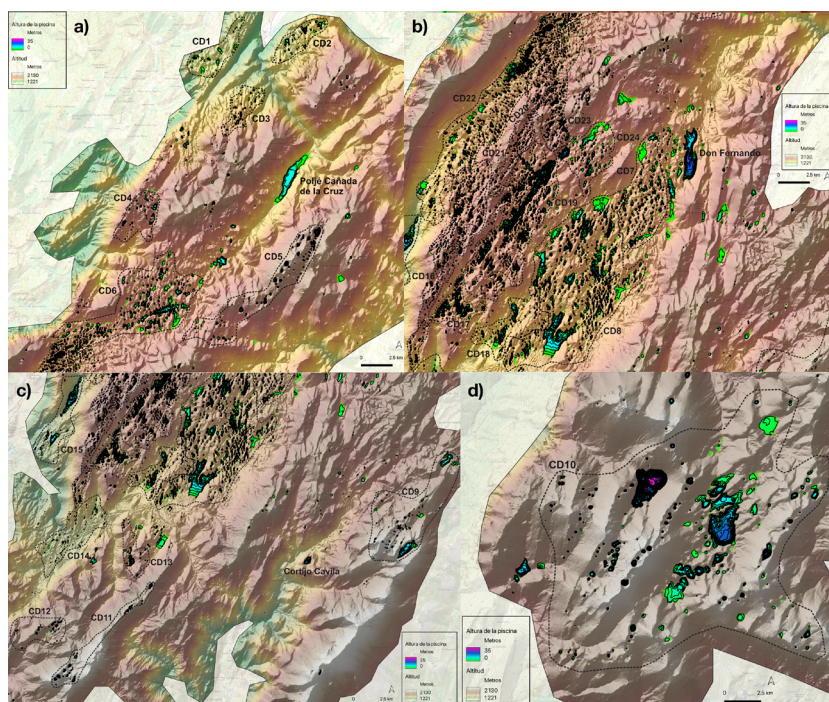


Figura 5. Campos de Hernán Pelea, Cabrilla y Sierra Seca y sus campos de dolinas principales, con la identificación reflejada en la Tabla 4: a) CD1 a CD6, b) CD7-CD8, c) CD10 y d) CD9 y CD11-CD15. Leyenda igual a las Figuras 3 y 4.

Figure 5. Hernán Pelea, Cabrilla and Sierra Seca fields and their main sinkhole fields with the identification reflected in Table 4: a) CD1 to CD6, b) CD7-CD8, c) CD10 and d) CD9 and CD11-CD15. Legend same as Figures 3 and 4

Además de los citados poljés, aparecen un total de 5 cerramientos topográficos, representados especialmente por dos grandes dolinas, aunque la de Pozo Romero (D14) presenta la coalescencia de tres subdolinas (uvala).

Por tanto, las dos mayores dolinas del área de estudio son la D2 del campo de Las Cruces – Coto de las Fábricas, y la dolina de Pozo Romero (D14), al sur del área de estudio. Ambas poseen las mayores alturas de piscina del área de estudio (30,9 y 28 m, respectivamente) y los mayores volúmenes con 1,9 y 2,2 hm³ respectivamente. Los valores ITO alcanzan 7,0 y 7,1 respectivamente.

La Tabla 3 muestra las principales dolinas, uvalas y poljés del Calar del Mundo, que *a priori*, poseen el mayor potencial de acumulación de aire frío nocturno bajo condiciones estables. Se trata de una tipología de dolinas en artesa, con pendientes suaves que generan un gran SvF, una altitud entre 1.416 y 1.607 m s.n.m, y volúmenes de piscina que, por lo general, no suelen superar 1,0 hm³ (salvo las excepciones de D2 y D5 en CD1, D2 en C3, y D10 y D14 fuera de los tres campos de dolinas analizados).

4.2 Características de los campos de dolinas en los Campos de Hernán Pelea, Calar de la Cabrilla y Sierra Seca (Jaén)

En el corazón central de la altiplanicie de Hernán Pelea aparece la mayor densidad de dolinas, uvalas y poljés del área de estudio, desarrollada sobre importantes espesores de dolomías blanquecinas del Cretácico Superior - Cenomaniense (hasta 300 m de potencia con estratificación masiva), y un 98,7% de carbonato cálcico; y sobre calizas y calizas margosas bien estratificadas del Senoniense superior, con espesores estratificados de hasta 40 m y 90 % de carbonato cálcico (López Limia, 1986). El control estructural de la fracturación, con sentido SO-NE, da lugar a alineaciones de los depósitos en los campos de dolinas. Es importante señalar que la mayor localización de dolinas a nivel altitudinal aparece sobre los 1.600 m s.n.m, al estar ligada a la presencia de superficies de erosión post-Tortonense (Foucault, 1971; López Bermúdez y López Limia, 1985).

Los factores geológicos anteriormente descritos condicionan una aptitud tremendamente favorable para el desarrollo de un exokarst evolucionado, lo que unido a las condiciones climáticas que caracterizan el área geográfica (elevada innivación y bajas temperaturas), genera una densa red de dolinas principalmente en los Campos del Espino, Pinar Negro, Cañada Rincón o Los Pocicos, entre otros. En total, tras el análisis topográfico efectuado se identifica un total de 3.650 cerramientos topográficos (dolinas, uvalas y poljes) de 2 m o más de altura de piscina. Un total de 3.327 se agrupan en 24 campos de dolinas que han sido delimitadas en el área de estudio según el grado de agrupación, orientación de las alineaciones, litología y altitud (Tabla 4).

Tabla 3. Principales campos de dolinas y características en el Calar del Mundo.
Table 3. Main sinkhole fields and their characteristics in Calar del Mundo.

ID	X	Y	Municipio	Altura piscina	SvF (0-1)	Altitud (m.s.n.m)	Volumen (hm ³)	ITO (0-10)
CD1. Las Cruces – Coto de las Fábricas								
D1	552609	4258470	Riopar	12,1	0,90	1.452,1	0,14	4,2
D2	552971	4258083	Riopar	30,9	0,90	1.416,2	1,90	7,0
D3	553100	4257089	Riopar	12,8	0,97	1.530,7	0,41	5,3
D4	552881	4257139	Riopar	17,9	0,92	1.532,9	0,12	5,1
D5	552397	4256977	Riopar	19,4	0,90	1.518,1	1,43	5,1
CD2. Viboreros								
D1	549409	4254959	Vianos	14,5	0,95	1.520,9	0,14	4,9
D2	550156	4254873	Vianos	16,2	0,91	1.536,7	0,18	4,8
D3	550056	4254548	Vianos	16,3	0,85	1.569,0	0,07	4,4
D4	549800	4254266	Vianos	15,1	0,91	1.560,2	0,10	4,8
D5	549671	4254027	Vianos	15,2	0,90	1.542,7	0,10	4,8
D6	550444	4254002	Vianos	16,9	0,88	1.607,4	0,10	4,6
D7	549379	4253503	Vianos	13,3	0,93	1.539,5	0,20	4,7
D8	550038	4253448	Yeste	10,2	0,97	1.556,4	0,31	5,2
CD3. Tejos – Cuerda Canto								
D1	545912	4250916	Vianos	19,3	0,89	1.519,9	0,22	4,5
D2	546241	4250840	Vianos	20,1	0,94	1.516,8	0,97	5,7
D3	545971	4250222	Vianos	13,8	0,89	1.570,5	0,06	4,0
Otras dolinas importantes fuera de los campos anteriores								
D9	552156	4255007	Riopar	11,5	0,96	1.526,5	0,88	5,1
D10	548238	4255263	Vianos	11,0	0,96	1.255,8	1,32	4,9
D11	548238	4255263	Siles	11,0	0,95	1.359,8	0,25	4,6
D12	543939	4248342	Siles	12,6	0,98	1.421,2	0,53	5,4
D13	544438	4248258	Siles	10,0	0,97	1.443,1	0,33	5,1
D14	543720	4247501	Siles	28,0	0,95	1.400,6	2,22	7,1
D15	540969	4246895	Siles	12,3	0,98	1.405,1	0,81	5,6

Por tanto, la densidad media de la totalidad del área de estudio se sitúa en 14,7 dolinas por km², pero tal y como se aprecia en la Figura 5, existen zonas donde hay total ausencia de dolinas. Es en la parte central de Hernán Pelea, donde las densidades son elevadísimas. Entre los campos de dolinas D6, 7, 8, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23 y 24 aglutinan una superficie de 30,6 km² (un 12,3 % del área de estudio), con un total de 2.668 dolinas. Por tanto, la densidad media en este sector es de 87.1 dolinas por km².

A continuación, se exponen las características más relevantes de los principales campos de dolinas según el número y la densidad de dolinas:

CD8. Los Pocicos – Las Marianas. Representa el campo con el mayor número de cerramientos del área de estudio, con un total de 399 dolinas y uvalas. Localizado en el sector centro-meridional de los Campos de Hernán Pelea, posee una densidad de 52,0 dolinas por km², una de las más bajas de las analizadas, especialmente por la gran extensión de la misma (7,7 km²). El campo de Los Pocicos – Marianas se localiza a una altitud entre 1.610 y 1.685 m s.n.m, a una altitud similar al resto de los campos del sector central de Hernán Pelea. Se trata de un campo donde predominan principalmente las dolinas en embudo, de tamaño pequeño y alineadas según un eje N-S. Las depresiones han sido excavadas sobre materiales del Cretácico Superior, constituidas por dolomías blanquecinas del Cenomaniense. En los sectores donde el proceso de dolinización ha sido más importante, aparecen uvalas de gran tamaño, destacando la mayor del campo (Figura 5). Se trata de la tercera dolina en importancia del área de estudio desde el punto de vista volumétrico, con un tamaño de 3,43 hm³, debido a su altura de piscina de 17,7 m, y presentando un excelente potencial frío gracias a un alto SvF (0,96).

Los fuertes contrastes térmicos quedan reflejados en el terreno, especialmente en un campo de dolinas que se encuentra a los pies de Puerto Lézar, donde se puede apreciar de una manera muy clara la influencia de los ciclos hielo – deshielo en los procesos de gelivación. Estas dolinas van ganando profundidad hacia el SSO siguiendo el sentido de la pendiente. El resultado es un rosario de dolinas alineadas según las directrices de las fracturas principales, (N20-30°E) (Figura 5), que cambian de fisionomía y carácter morfogénico de acuerdo con su situación relativa: las más septentrionales, próximas al Puerto Lézar, son las menos profundas y de pendiente más suave. Las situadas en el extremo sur del campo de dolinas tienen la mayor profundidad y tamaño, debido a una evolución más compleja, caracterizada por la sucesión de varias fases de colapso, que han dado lugar a un tipo de dolina en graderío.

CD10. Calar de la Cabrilla. Sin duda, se trata del campo de dolinas más singular del sector central de Hernán Pelea. Las dolinas se desarrollan desde una altitud mínima de 1.836 hasta los 2.040 m s.n.m, constituyendo las dolinas más elevadas del área de estudio, junto a las de Sierra Seca. Las diferencias respecto al resto de campos de dolinas son evidentes, destacando el menor control estructural de las líneas de fractura en la zona, aunque con unas dolinas que están dispuestas en sentido SO-NE. La particularidad de este campo es que aparecen las líneas de las cumbres de la Sierra de la Cabrilla y las de Buitreras – Empanadas en dicha disposición. Aquí se distinguen dos tipologías de dolinas. Una formada por un rosario de dolinas circulares, de tipo embudo, y rondando los 2.000 m de altitud (aquí aparecen algunas de vertiente en la ladera del cerro de los Tornajos), y por otro, las enormes dolinas en la zona más baja del altiplano (Nava de los Troncos y Nava del Polvo). Se trata de las dos dolinas con índice ITO más elevado, o lo que es lo mismo, con el mayor potencial frío del área de estudio (Tabla 5). Estas dolinas están monitorizadas con termómetros registradores, marcando un valor de -28,8 °C en enero de 2021 (Espín Sánchez, 2021). Las dolomías blanquecinas del Cenomaniense configuran la litología del campo del Calar de la Cabrilla, erosionadas hasta una altura de piscina de 34,8 metros en la Nava del Polvo, la más importante del área de estudio (Figura 5). En la Sierra de la Cabrilla se distinguen dos secuencias de 7 a 10 m cada una, de calizas micríticas blancas y recrystalizadas, con tamaño de grano muy fino. Aquí, junto a la otra gran dolina del lugar (Nava de los Troncos), los intensos procesos de crioclastia y gelifración del pasado han contribuido a la configuración de estas grandes dolinas.

CD22. Pinar Negro. Su topografía dibuja una gran depresión cerrada en donde se individualizan una sucesión de pliegues anticlinales y sinclinales de direcciones N 20°-40° E; desde el gran escarpe del Banderillas, en el flanco noroccidental de la Sierra.

El campo de dolinas, establecido en los materiales carbonáticos del Cenomaniense se estructura según los principales accidentes del terreno (N 20-30° E). Según López Limia y López Bermúdez (1985) predominan las dolinas de disolución, que son las más numerosas, dolinas de subsidencia y dolinas de hundimiento. Se trata, por tanto, de un enorme campo de dolinas, que alcanza los 5,8 km de longitud, en los que en sus 4 km² alberga 395 dolinas (el segundo de mayor importancia del área de estudio) (Figura 5). Esto da lugar a una densidad notable, con 97,8 dolinas por km². En general, la disposición de la línea de dolinas sigue la fracturación general del área de estudio (SO-NE), sobre las dolomías blanquecinas del Cenomaniense.

Las dolinas del Pinar Negro se caracterizan por una pérdida de altitud a medida que se desciende latitudinalmente hacia el sureste, constituyendo un evidente gradiente altitudinal entre el sector noreste

con altitudes de hasta 1.684 m s.n.m., y el suroeste con 1.577 m s.n.m. En general, aparecen dolinas con formas muy variadas, aunque a medida que aumenta la latitud y la altitud, los cerramientos son más evolucionados y con un mayor volumen. Es aquí donde aparece la uvala más importante del campo, con un volumen notable de 2,07 hm³ y una altura de piscina de 18,8 ms (Figura 5). El SvF sin ser excepcional, alcanza 0.92.

Tabla 5. Principales campos y características de las principales dolinas en Hernán Pelea.
Table 5. Summary of the main sinkhole fields and their characteristics in Calar del Mundo.

Paraje	Municipio	X	Y	Altura piscina (m)	SvF (0-1)	Altitud (m.s.n.m)	Volumen (hm ³)	ITO (0-10)
CD1. Umría de Parra								
D1	Santiago	524599	4215686	9,2	0,97	1.542,8	0,04	4,7
CD2. Monte Mariasnal								
D2	Santiago	527215	4216372	12,6	0,94	1.571,1	0,11	4,7
CD3. Pinar del Risco								
D3	Santiago	525688	4214223	14,4	0,94	1.632,9	0,04	4,7
CD4. La Capellanía								
D4	Santiago	522873	4211710	14,3	0,90	1.714,4	0,06	4,6
CD5. Las Palomas – Chaparras								
D5	Santiago	526800	4210725	25,0	0,82	1.891,3	0,13	5,6
D6	Santiago	527513	4211489	28,6	0,89	1.815,3	0,37	6,5
CD6. Campo del Espino								
D7	Santiago	527513	4211489	14,7	0,97	1.687,3	1,06	5,6
CD7. Monterilla								
D8	Santiago	527513	4211489	12,5	0,96	1.650,5	0,35	5,1
CD8. Los Pocicos – Las Marianas								
D9	Santiago	521875	4201154	17,7	0,96	1.617,8	3,43	5,8
D10	Santiago	521875	4201154	14,9	0,95	1.651,3	0,86	5,3
D11	Santiago	521769	4203172	18,5	0,90	1.653,7	0,29	4,9
CD9. Juan Fría – Sierra Seca								
D12	Castril	527286	4199035	16,6	0,95	1.959,1	0,95	6,1
CD10. Calar de la Cabrilla								
D13	Cazorla	516628	4193076	21,4	0,97	1.853,2	1,65	6,7
D14	Cazorla	515791	4193633	34,8	0,90	1.835,0	1,64	7,9
D15	Cazorla	515566	4192597	23,6	0,74	1.981,6	0,05	4,7
CD11. Cuerda Empanadas								
D16	Cazorla	517511	4195453	26,9	0,78	1.998,1	0,11	5,6
CD12. Torcas de Navalasno								
D17	Cazorla	516951	4196847	15,6	0,78	1.872,9	0,01	4,0
CD13. Cuerda de los Guillerminos								
D18	Santiago	519601	4198688	15,6	0,93	1.658,2	0,27	5,2
CD14. Nava Noguera – Rambla Seca								
D19	Cazorla	518584	4200155	6,0	0,97	1.567,8	0,02	4,7
CD15. Aguas Negras								

D20	Santiago	518627	4202190	15,1	0,95	1.518,8	1,02	5,6
CD16. Cuerda de la Nieve – Risco								
D21	Santiago	517858	4203342	20,9	0,83	1.710,5	0,05	4,8
D22	Santiago	519172	4203056	19,4	0,83	1.709,0	0,12	4,5
CD17. Llanos de la Rambla								
D23	Santiago	518788	4201745	19,9	0,94	1.649,1	0,65	5,7
D24	Santiago	519148	4201715	18,2	0,96	1.643,0	0,91	5,7
CD18. Puerto Lézar								
D25	Santiago	520544	4201640	11,0	0,97	1.606,9	0,28	5,4
D26	Santiago	520160	4200948	12,5	0,97	1.596,4	0,40	5,3
CD19. Cañada Rincón								
D27	Santiago	520533	4203913	27,4	0,93	1.659,3	6,31	7,2
CD20. Los Chiclanos								
D28	Santiago	519457	4203949	19,0	0,92	1.666,9	0,36	5,2
CD21. Las Camarillas								
D29	Santiago	519974	4204828	15,5	0,81	1.731,3	0,02	4,2
CD22. Pinar Negro								
D31	Santiago	521312	4207737	16,9	0,92	1.660,2	0,07	5,1
CD23. Calar del Pino								
D31	Santiago	521312	4207737	16,9	0,92	1.660,2	0,07	5,1
CD24. La Losilla – Cueva Humosa								
D32	Santiago	521671	4205402	19,7	0,95	1.683,7	0,51	5,6
Fuera de los anteriores campos de dolinas								
D33	Santiago	524574	4198716	8,7	0,96	1.584,2	0,99	5,5
D34	Santiago	524719	4205281	23,8	0,94	1.638,6	3,70	6,4
D35	Castril	524574	4198716	16,2	0,95	1.629,5	0,23	4,8

4.3 Potencial frío a través de índice termo-orográfico (ITO)

El Calar del río Mundo constituye una extensa plataforma calcárea con un gran número de depresiones cerradas que le confieren, aunque en menor medida que Hernán Pelea y la Cabrilla, un ámbito geográfico potencialmente muy frío. La explicación a la diferencia de potencial frío con este último radica en que la extensión de la plataforma es menor (66 frente 248 km²), prácticamente un 25 % respecto al total, una altitud media algo menor (entre 1.400 y 1.500 m s.n.m), y un campo de dolinas, que, aunque es muy notable (704 dolinas con una densidad de 10,4 dolinas por km²), se sitúa muy por debajo de las 87,1 dolinas por km² del sector central de Hernán Pelea.

Una de las particularidades del Calar del Mundo es que topográficamente es muy abierto, en general, con dolinas que presentan un SvF muy elevado. Ello le confiere un potencial frío importante. La Figura 6 muestra el SvF del área de estudio, en el que se observa como los principales tres campos de dolinas, más las ubicadas en el sur (Pozo Romero), obtienen ya no solo SvF muy elevados en el fondo de las dolinas, sino que, a nivel general, los valores son muy elevados en gran parte del territorio.

A pesar de ello, los valores ITO en el Calar del Mundo son inferiores a los registrados en la plataforma de Hernán Pelea y Cabrilla, como se expone a continuación. El Calar del Mundo registra un valor ITO medio de 4,60, y un tope máximo de 7, localizado en varias dolinas. Por su parte, los Campos de Hernán Pelea y la Cabrilla obtienen un promedio de 5,1 (Tabla 6).

Los valores más elevados en el Calar del Mundo (7) se registran en la dolina de Pozo Romero (Figura 6), siendo la mayor extensión de las localizaciones identificadas. Aparece también en la dolina de La Navilla, al sur del área de estudio, y algunos enclaves cercanos al Morro de Santa Ana.

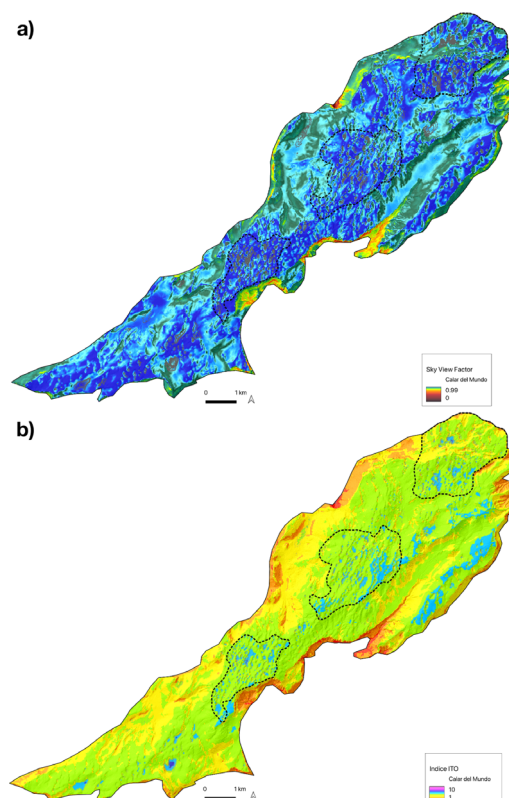


Figura 6. Cartografía que muestra: a) SvF, y b) índice ITO en el Calar del Mundo.

Figure 6. Cartography showing: a) SvF, and b) ITO index in Calar del Mundo.

En el CD3 (Tejos – Cuerda Canto) aparece en la Dolina D2, siendo el punto potencial más frío en este sector. Por su parte, en el CD (Viboreros) ninguna de las dolinas identificadas supera el umbral ITO de 7. Finalmente, el campo de dolinas CD1 (Coto de las Fábricas) es el que obtiene un mayor número de dolinas con valor ITO 7, concretamente en las dolinas D2, D3 y D5. Por tanto, el número total de dolinas con un índice ITO 7 es de 7 dolinas.

Tabla 6. Superficie y porcentaje de los diferentes umbrales ITO para el área de estudio.

Table 6. Main sinkhole fields and their characteristics in the Hernán Pelea, Sierra Seca and Calar de la Cabrilla fields.

Valores ITO	Calar del Mundo		Hernán Pelea, Cabrilla y Sierra Seca	
	Extensión (km ²)	%	Extensión (km ²)	%
1	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,31	0,46	0,43	0,17
3	5,34	8,04	6,49	2,61
4	18,87	28,42	17,32	6,98
5	38,05	57,32	86,59	34,9
6	3,77	5,68	134,21	54,09
7	0,04	0,06	2,60	1,05
8	0,00	0,00	0,43	0,17
9	0,00	0,00	0,02	0,01
10	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	66,38	100,0%	248,1	100,0%

En la actualidad no existe ninguna monitorización térmica en ninguno de los 3 campos de dolinas identificados del Calar del Mundo, pero sí que en años anteriores existe registro térmico en una de las dolinas de Viboreros, en la Cañada de las Yeguas, Cañada de los Mojones y Media Fanega.

La dolina de Viboreros ha estado monitorizada desde el punto de vista térmico por el autor, registrando en el periodo de análisis la dolina más fría monitorizada del área de estudio, (18 de noviembre de 2017 al 23 de agosto de 2020). En los casi 3 años de longitud de serie destaca por registrar una temperatura media anual de las mínimas de 3,9 °C y un promedio de la temperatura mínima absoluta anual de -15,1 °C en los tres inviernos de observación (2017-2018, 2018-2019 y 2019-2020). El promedio del número medio de heladas en los años agrícolas completos existentes es de 118 heladas (113 y 123), con un periodo de heladas de octubre a junio.

La temperatura mínima absoluta se registró el 13 de diciembre de 2017 con un valor mínimo de -19,4 °C. Durante esa misma jornada se registraron temperaturas mínimas absolutas de -15 °C en la Cañada de las Yeguas (Calar del Mundo) y valores considerablemente más bajos en los Campos de Hernán Pelea y la Cabrilla (-23,4 °C en la Nava del Polvo y -20,1°C en una de las dolinas del campo de Monterilla). Es el episodio potencialmente más frío en las que han podido ser comparadas ambas áreas de estudio.

Por su parte, si se analiza la temperatura media de las mínimas durante el mismo periodo homogéneo anteriormente citado (18 de noviembre de 2017 al 23 de agosto de 2020), se constata como los valores son más bajos en el Calar de la Cabrilla (Nava del Polvo con 1,7 °C, y Monterilla con 1,6 °C). Monterilla y Nava del Polvo registran un valor medio de 151,3 y 150,5 heladas anuales respectivamente, mientras, que La Nava del Polvo registra una temperatura media de las mínimas absoluta de -19,9 °C, y en Monterilla de -18,5 °C (Espín Sánchez et al., 2021). En términos generales se constata un mayor potencial frío en el Calar de la Cabrilla y Hernán Pelea.

Pero, además, la dolina de Pozo Romero (D14), como se detalla anteriormente, se encuentra monitorizada desde el 15 de junio de 2019, aunque no puede ser comparada con la serie temporal del resto de ubicaciones de Hernán Pelea-Cabrilla y Calar del Mundo. Sin duda se trata del cerramiento topográfico más frío del Calar del Mundo, con una temperatura mínima de -25,3 °C (12 de diciembre de 2021). Durante esta jornada se registró una temperatura mínima absoluta de -28,8 °C en la Nava de los Troncos y -25,4 °C en Don Fernando. Además, los datos promedio son realmente llamativos. Registra una temperatura media anual de las mínimas de -0,1 °C, así como un promedio de temperaturas mínimas absolutas de -16,9 °C, y un total de 168 heladas anuales durante los cuatro años de observación con un termómetro registrador propio (2019-2020, 2020-2021, 2021-2022, 2022-2023 y 2023-2024).

Los Campos de Hernán Pelea, Calar de la Cabrilla y Sierra Seca constituyen una enorme altiplanicie kárstica con un gran potencial para el registro de temperaturas mínimas extremas, tal y como se expone en los análisis de Espín Sánchez et al. (2021). La confección de la cartografía del índice ITO es un paso más en la búsqueda potencial de los puntos más fríos de las áreas de estudio analizadas. Varios factores se unen para que sea una de las zonas más frías de la Península Ibérica (elevada altitud media superior a 1.700 m s.n.m, extensa superficie calcárea bordeada de sistemas montañosos que alcanzan los 2.000 m s.n.m, la identificación de 3.650 dolinas que, sin duda, generan un sobreenfriamiento notable durante las madrugadas estables, una gran recurrencia de los días de nevada al año, y finalmente, uno de los factores más influyentes en la génesis de temperaturas extremas: el *Sky View Factor* o factor de cielo visible.

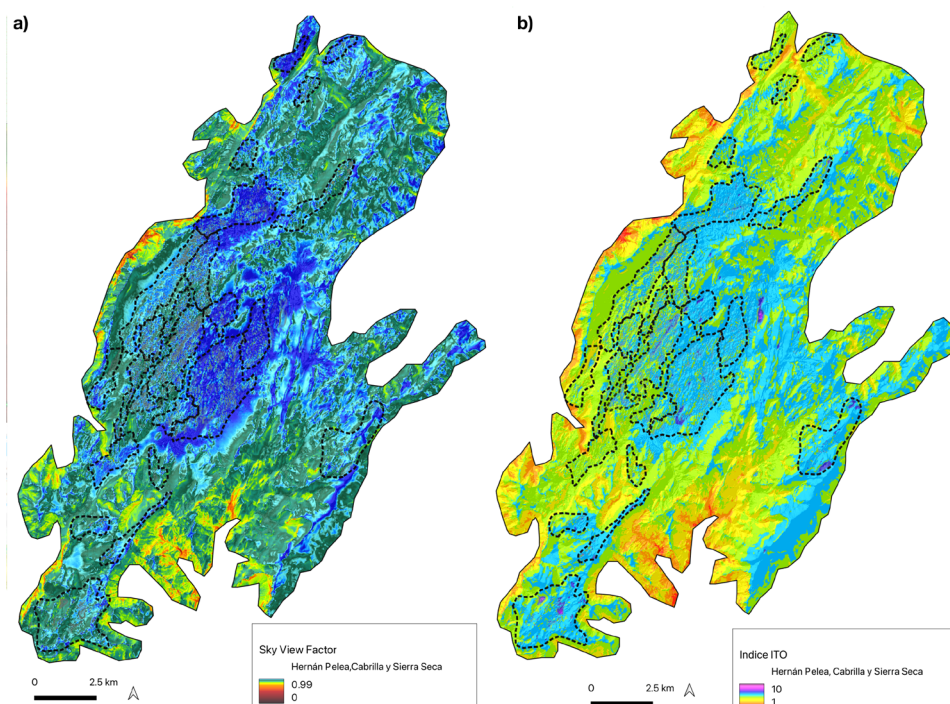
La figura 7 muestra el SvF de Hernán Pelea, Cabrilla y Sierra Seca, donde se puede comprobar como los valores más elevados aparecen en el núcleo central de Hernán Pelea, con valores próximos a 0,99. Aquí se encuentran, casi en su totalidad, los campos de dolinas CD1 (Umbria de Parra), CD6 (Campo del Espino), CD7 (Monterilla), CD8 (Los Pocicos – Las Marianas), y CD24 (La Losilla – Cueva Humosa). Esto es determinante, justo al resto de factores, para que la mitad este del sector central sea potencialmente más fría, con valores ITO que se sitúan en torno a 6, mientras que, en el sector más occidental (Pinar Negro, Cañada Rincón, Las Camarillas o Los Chiclanos) se registran valores de 5. En ese sentido, con una altitud similar, el SvF es determinante en un mayor potencial frío durante las madrugadas estables.

Aunque las depresiones topográficas potencialmente más frías, con un valor de 8 y 9, se localizan en la Nava del Polvo con 9 y Nava de los Troncos con 8 (Calar de la Cabrilla). El único punto de los Campos de Hernán Pelea que registra un valor de 8 es Don Fernando (Figura 7). Estos tres puntos han sido monitorizados durante los últimos años con termómetros registradores como se detalló anteriormente.

El resto de las depresiones potencialmente más frías, con un valor 7, aparecen en varios campos de dolinas del área de estudio. Donde más abundan es en CD10 (Calar de la Cabrilla) con un total de 25

dolinas, principalmente debido a su mayor altitud. También sobresalen, en el corazón de Hernán Pelea, en los campos CD6 (Campos del Espino) con 10 dolinas, CD5 (Calar de las Palomas) con 8, CD24 (La Losilla – Cueva Humosa) con 7 dolinas, CD8 (Los Pocicos – Marianas) con un total de 7, o finalmente en CD19 (Cañada Rincón), con 5.

Figura 7. Cartografía que muestra: a) SvF, y b) índice ITO en los Campos de Hernán Pelea, Calar de la Cabrilla y Sierra Seca.
Figure 7. Cartography showing: a) SvF, and b) ITO index in Campos de Hernán Pelea, Calar de la Cabrilla y Sierra Seca.



5. Discusión

La delimitación de los Campos de Hernán Pelea, en pleno corazón de la Sierra de Segura (Jaén), no ha terminado de estar lo suficientemente clara en los análisis anteriores efectuados hasta la fecha. El primero en poner de relieve la existencia de un altiplano kárstico en la Sierra de Segura fue Foucault (1971), mientras, que Moral (1992) concluyó que la plataforma es una superficie de arrasamiento del final del Mioceno que se desarrolla en un importante exokarst. Y no es, sorprendentemente, hasta los análisis de finales de los años setenta y de la década de los ochenta (Rodríguez Estrella, 1978; López Limia y López Bermúdez, 1985; López Limia, 1986, 1987), cuando se estudian desde el punto de vista geomorfológico los campos de dolinas y lapiazes. En época más reciente, sólo aparece el análisis de Moral (1992), existiendo un largo vacío de estudios de la altiplanicie de Hernán Pelea hasta 2005 (Moral Martos, 2005; Moral Martos et al., 2005), y más recientemente a partir de 2018 (Espín Sánchez et al., 2018; Espín Sánchez, 2021; Moral Martos, 2019; Carrasco Martín et al., 2023). Como afirma Otero (1998) resulta sorprendente la escasez de investigaciones llevadas a cabo en este extenso macizo intensamente karstificado, y ninguno de carácter global.

La Sierra de Segura ocupa más de 3.000 km² en las cabeceras de los ríos Guadalquivir y Segura (Moral Martos, 2019), constituyendo uno de los mayores afloramientos carbonáticos de la Península Ibérica (Rovira Medina et al., 2023), de los que la altiplanicie de los Campos de Hernán Pelea adquiere una extensión aproximada de 800 km², con una altitud comprendida entre 1.600 y 1.800 m s.n.m. Desde luego parece muy exagerada dicha extensión, o equivocada la nomenclatura utilizada, incluso si se incluyen los calares de Poyotello o Guillimona. Es probable que los autores se refieran a un valor de 80 km² para Hernán Pelea y zonas adyacentes o se hayan confundido con el altiplano de la Sierra Segura definido como la extensa paleosuperficie de relieve poco accidentado que se extiende hasta el Calar del Mundo, estimada en 833 km² según Moral Martos (2005). Al sur (Hernán Pelea, Poyotello, Guillimona, Cabrilla...) presenta

una notable continuidad, mientras que al norte ha sido parcialmente desmantelada por la erosión fluvial y sólo se conservan fragmentos aislados del antiguo altiplano (Navalperal, Espino, Sima...).

Es preciso considerar que a menudo se tiende a confundir la plataforma o altiplano kárstico de la Sierra Segura con la de Hernán Pelea. Además, durante los últimos años, en diferentes artículos divulgativos, se ha afirmado que la plataforma kárstica de Hernán Pelea es el altiplano de mayor extensión en España; sin embargo, los autores no han encontrado ninguna referencia científica respecto a tal afirmación, ni siquiera a la antigua paleosuperficie kárstica definida anteriormente. Desde la presente investigación se concluye que la plataforma kárstica de Hernán Pelea oscilaría entre 45,3 y 59,5 km², mientras, que, junto al Calar de la Cabrilla y Sierra Seca ascendería a 248,1 km². La delimitación más amplia, que abarcaría la isohipsa de 1.300 m de altitud, donde se incluiría el Calar de Poyotello y Sierra de la Guillimona, obtendría una superficie de 717,5 km².

El sector suroccidental de Hernán Pelea (Pinar Negro) fue descrito por López Limia y López Bermúdez (1985), con una superficie calcárea de unos 25 km² (intensamente karstificada), con una altitud media de 1.750 m s.n.m., mientras que, López Limia y López Bermúdez (1998), estiman una superficie de 99 km² de extensión en los análisis de Pinar Negro, probablemente haciendo alusión a buena parte de Hernán Pelea y alrededores. En ese sentido, tras los análisis efectuados por los autores en la sección anterior de resultados del presente artículo, cifran una extensión de 45,3 km² para el sector central o núcleo de la altiplanicie de Hernán Pelea, aunque son conscientes de la dificultad de la delimitación. En ese sentido, se quedaría fuera el Campo del Espino y Calar de las Palomas al norte, y los campos de Rambla Seca y Nava Noguera al sur. Si se incluyen estos últimos, la superficie asciende a 59,5 km². En todo caso, muy inferior a las tradicionalmente propuestas por los estudios citados anteriormente.

López Limia (1986) identifica mediante fotografía aérea y trabajo de campo un total de 1.880 formas simples en lo que la autora denomina el paraje de Pinar Negro, pero sin una delimitación clara, con una densidad de 80 dolinas por km². A pesar de ello, la densidad media obtenida en una muestra realmente elevada de cerramientos se asemeja mucho a la obtenida en este estudio para el sector central de Hernán Pelea (87,1 dolinas por km²). Moral Martos (2005, 2019), años después, identifica más de 3.100 formas exokársticas, cerradas (casi todas dolinas) en la Sierra de Segura, donde la mayor densidad de dolinización coincide con una franja estrecha de 6 km que recorre el borde occidental desde el Calar del Mundo hasta la Sierra de Castril, incluidos el monte Mariasnal, los Campos de Hernán Pelea, y la Sierra de la Cabrilla. Según el autor, la mayoría de las formas exokársticas más importantes se sitúan entre los 1.600 y 1.750 m s.n.m., señal de que la altiplanicie no ha sido desmantelada por procesos erosivos reactivados. El análisis lo efectúa a través de fotografía aérea, lo que permitió identificar más de 3.000 dolinas repartidas por todas las cumbres de la sierra, aunque son especialmente abundantes en el Calar del Mundo, en los Campos de Hernán Pelea, en la Sierra de la Cabrilla y en Sierra Guillimona. En algunos sectores, como el Pinar Negro, se observan formas cónicas y densidades extraordinariamente altas de dolinización (hasta 240 dolinas por km²), que, en opinión de López Limia (1987), recuerdan una morfología de tipo “cockpit”, posiblemente debido a la existencia de un antiguo sistema morfoclimático tropical. Aunque es difícil comparar densidades de dolinas al no analizar la misma superficie de estudio, en la presente investigación el campo de dolinas de Camarillas registra una densidad de 180,8 dolinas, un sector entre Pinar Negro y Cañada Rincón, también con una alta densidad de dolinas.

López Bermúdez (1974), por su parte, identifica más de 1.000 dolinas en el Calar del Mundo, afirmando que es el segundo calar con el mayor número de concentración de dolinas en España. Una cifra superior a la identificada en el presente estudio (704), probablemente por la dificultad de identificar agrupaciones de dolinas en uvalas mediante trabajo de campo.

Por su parte, la densidad de dolinas en el Calar de Hernán Perea es muy superior también al de los calares adyacentes. Romero Díaz (1985) identifica 632 dolinas en 68 km² (densidad de 9,3 dolinas por km²), y comparándola con dos sectores cercanos muestra una densidad superior al karst de Sierra Gorda (Granada) analizado por Pezzi (1977), que presenta una densidad de 7,9, aunque inferior al karst del Calar del Mundo (Albacete) estudiado por López Bermúdez (1974) con una densidad de 17,5. Por tanto, se muestra lejos incluso de la densidad general obtenida en este artículo de 14,7 dolinas por km² en Hernán Pelea, Cabrilla y Sierra Seca.

Es preciso considerar que la identificación de dolinas efectuada en el presente artículo es la primera que utiliza herramientas topográficas y cartográficas mucho más precisas gracias al avance en modelización

topográfica de los SIG, así como la mayor resolución de los modelos digital de elevación (DEM). En los años más recientes el avance de los SIG ha permitido la delimitación más detallada de cerramientos topográficos.

Durante las últimas décadas han sido estudiados probablemente los mayores campos de dolinas de España, entre los que sobresalen los efectuados en las dolinas de Villar del Cobo (Teruel) (Gutiérrez y Peña, 1979; Martín Escorza, 1991) donde se identifican 414 dolinas en 96 km² (4,3 dolinas por km²); Gracia (2012) estudia cuatro campos de dolinas en el sector central de la Cordillera Ibérica, identificando 875 depresiones (campos de Tortuera, Odón, El Villarejo, y Villaroya), entre las provincias de Zaragoza y Teruel. Pardo-Igúzquiza et al. (2016) estudian el macizo kárstico de la Sierra de las Nieves identificando 324 dolinas con un tamaño superior a 250 m mediante análisis fractal.

Gutiérrez y Peña, (1979) y Sánchez Fabre et al. (2010) analizan los campos de dolinas de la Sierra de Albarracín (Llanos de Pozondón, Villar del Cobo, Frías de Albarracín o Muela de San Juan). Se identifican un total de 45 dolinas en los Llanos de Pozondón, algunas de ellas de hasta 350 m de diámetro, y 37 en la paramera sur de la sierra de Albarracín.

Uno de los trabajos análogos más interesantes es el estudio y caracterización de un campo de dolinas en la Sierra de Guara (Huesca) mediante Sistemas de Información Geográfica (Albardía García, 2020). El autor concluye conveniente analizar la zona mediante tecnología más moderna con el fin de actualizar los trabajos previos. Años antes, Rodríguez (1983) contabilizó 284 dolinas en un área de 8,4 km² (29,5 dolinas por km²). Posteriormente Iturbe obtiene un total de 318 dolinas identificadas a través de la digitalización de dolinas partiendo de DEM de diferente resolución (MDT05 y Lidar 1ª cobertura).

Los resultados obtenidos en el presente análisis referentes al índice ITO muestran los mayores potenciales fríos en dolinas con las mayores alturas de piscina, mejores índices *Sky view Factor*, mayor altitud sobre el nivel del mar, y mayor capacidad de almacenaje (volumen). Todos estos factores topográficos han sido analizados durante las últimas décadas, pero no ha sido elaborado ningún índice termo-orográfico para su comparativa. Ni si quiera en España se han analizado los factores geomorfológicos referentes a dolinas. Si se han realizado durante los últimos años en otros ámbitos planetarios, destacando el reciente trabajo de Renon (2011) quien determina que las características morfológicas y geométricas de la dolina tienen una gran importancia en el descenso de la temperatura en condiciones de estabilidad atmosférica, especialmente los parámetros de altura de piscina, área, volumen y el *Sky view factor*. Pero además pudo observar la importancia de la altitud y la exposición a vientos de gran altitud. Sin embargo, para comprender mejor estos procesos de enfriamiento, es necesario monitorizar la depresión de forma más completa, con puntos de medición también a lo largo de las laderas y en el collado de aliviadero, así como realizar mediciones de otras magnitudes físicas, como el viento y la radiación solar y terrestre. En su análisis realizado, la dolina de Manna (2.550 m) (Italia) llega a registrar una temperatura mínima de -47,0 °C en 2009. Dolina con unos parámetros geomorfológicos de 0,91 de SvF, 2.546 m s.n.m, 33 metros de altura de piscina, y un volumen de 1.900.000 m³.

Más recientemente, Dorninger (2016) analiza los factores topográficos y meteorológicos influyentes en las temperaturas mínimas en el Kaltluftseen. Concluye que para registrar una temperatura mínima lo más baja posible se requieren dos condiciones: primero, una temperatura inicial lo más baja posible del aire y, segundo, que el balance energético del volumen de aire en la dolina sea negativo durante el mayor tiempo y con la mayor intensidad posibles. Además, concluye que los factores topográficos y meteorológicos interactúan de diversas maneras. Pero tal es su importancia, que el autor concluye que si alguno de los factores topográficos (SvF, altitud o altura de piscina) no se encuentra dentro del rango ideal, se descartaría su potencial para el registro de temperaturas mínimas extremadamente bajas. Todo ello teniendo en cuenta que los factores meteorológicos nocturnos sean lo más estables posibles (viento débil en altura, ausencia de nubosidad...). Aquí entra en juego el factor topográfico del volumen. A mayor almacenaje de aire frío más dificultad para erosionarse por vientos en niveles medios y altos atmosféricos.

En su análisis, la dolina de Grünloch (Austria) registra una temperatura mínima de -52.6 °C en 1.932 con una altitud del fondo de la dolina de 1.270 m s.n.m, una altura de piscina de 54 m, un SvF de 0,91, y un volumen total de 7.000.000 m³

En definitiva, los Campos de Hernán Pelea en primer término, y el Calar del Mundo, son las dos superficies o altiplanos kársticos con el mayor número y la mayor densidad de dolinas de la Península Ibérica, con un total de 3.650 y 704 dolinas respectivamente. Esto le confiere un especial potencial frío durante madrugadas estables, tal y como se ha determinado con la aplicación del índice ITO. Si los

factores anteriormente analizados son en gran medida ideales (unas características geomorfológicas de la dolina perfecta para el acopio de air frío, y una masa de aire de baja energía, así como condiciones de vientos suaves con mínima nubosidad, la formación de piscinas de aire frío (CAP) están aseguradas en las principales dolinas del área de estudio. Sin embargo, queda abierta para futuras líneas de investigación la influencia de parámetros locales tales como humedad local, capa de nieve, o la vegetación.

6. Conclusiones

En el Calar del Mundo se han identificado un total de 704 cerramientos topográficos, concentrados en su mayor parte en tres campos principales de dolinas con una extensión total de 13,3 km². Esto supone una densidad media de 10,6 dolinas por km², aunque entre los tres campos la densidad media asciende a 34,4 dolinas por km². Destaca el CD3 (Torca de los Tejos – Cuerda Canto) con una densidad media de 46,0 dolinas por km².

Entre las dolinas que registran el mayor potencial frío destaca la de Pozo Romero (D14) con 7,1 o la D2 del CD1 (Las Cruces-Coto de las Fábricas con 7,0. En general, las dolinas con el mayor potencial frío obtienen alturas de piscina entre 11 y 31 metros de piscina, SvF entre 0,88 y 0,98, altitudes medias del fondo de dolinas entre 1.400 y 1.607 m, y volúmenes que se sitúan por lo general por debajo de 1 hm³, salvo algunas excepciones como las de Pozo Romero (2,2 km³).

Por su parte, en los Campos de Hernán Pelea se identifica el mayor número de dolinas de ambas áreas de estudio, constituyendo muy probablemente el ámbito geográfico de mayor relevancia kárstica de la Península Ibérica. Se identifica un total de 3.650 cerramientos topográficos que da lugar a una densidad media de 14,7 km², aunque en el sector central del calar la densidad media se sitúa en 87,1 dolinas por km². Algunos campos de dolinas, como el de la Cuerda de la Nieve-Risco (CD16) llegan a alcanzar 172,6 dolinas por km². En total aparecen 24 campos de dolinas y tres grandes dolinas fuera de éstos.

Entre las dolinas identificadas destaca la D14 del Calar de la Cabrilla (CD10) con el valor ITO o mayor potencial frío, con un valor de 7,9, el más elevado de ambas áreas de estudio. Se trata de la mega-dolina de la Nava del Polvo. Finalmente, en el sector central de los Campos de Hernán Pelea destaca la D27 de Cañada Rincón (CD19) con un valor de 7,2. En general, las dolinas con el mayor potencial frío obtienen una altura de piscina entre 8 y 34,8 m, una SvF entre 0,83 y 0,97, una altitud media heterogénea, entre el sector central de la altiplanicie de Hernán Pelea (1.540-1.670 m) y el Calar de la Cabrilla, con altitudes entre 1.830 y 1.982 m.

En definitiva, las áreas de estudio analizadas poseen varios factores geomorfológicos y climáticos (elevada altitud media, superficie kárstica, aislamiento por reborde topográfico altitudinalmente superior), que las convierten en una de las zonas más frías de la Península Ibérica. Potenciados por la elevada densidad de cerramientos topográficos, los índices ITO calculados sugieren temperaturas mínimas extraordinariamente bajas, corroborando varios de los valores mínimos registrados en alguna de las dolinas monitorizadas por Espín Sánchez et al., (2021) en años anteriores. Algunos ejemplos se dan en la dolina de Viboreros (Calar del Mundo) con un valor mínimo de -19,4 °C (13 de diciembre de 2017), Pozo Romero con -25,3 °C (12 de enero de 2021) o los -25,4 °C en Don Fernando (Hernán Pelea) y los -28,8 °C registrados junto a la Nava del Polvo (Nava de los Troncos) el 12 de enero de 2021.

Disponibilidad de datos

Los datos que respaldan las conclusiones de este estudio pueden solicitarse al autor correspondiente David Espín Sánchez. Los datos no están a disposición del público ya que han sido tratados a través de los archivos raster de los modelos digitales de elevación (MDT02) del Instituto Geográfico Nacional (IGN) que pueden ser descargados de forma gratuita en la web del CNIG: <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/home>

Declaración conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen intereses económicos en competencia ni relaciones personales que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

Fuentes de financiación

Este trabajo ha sido financiado gracias a la concesión de una ayuda postdoctoral “Margarita Salas”, integrada dentro del Programa para la Recualificación del Sistema Universitario Español durante el trienio 2021-2023 del Ministerio de Universidades del Gobierno de España.

Declaración de contribución de autoría

David Espín Sánchez, primer autor: Conceptualización, descarga y tratamiento de datos, cartografía asistida por ordenador, metodología, resultados, discusión, Redacción - borrador original, Redacción - revisión de pruebas y edición.

Jorge Olcina Cantos, segundo autor: Introducción, revisión de resultados, discusión, conclusiones, revisión bibliográfica, Redacción, borrador original, Redacción - revisión de pruebas.

Referencias

- Albardía García, D., 2020. *Estudio y caracterización de un campo de dolinas en la Sierra de Guara mediante Sistemas de Información Geográfica*. Trabajo de Fin de Grado, Universidad de Zaragoza.
- Arduini, G., Chemel, C., Staquet, C., 2020. Local and non-local controls on a persistent cold-air pool in the Arve River Valley. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(731): 2497-2521. <https://doi.org/10.1002/qj.3776>
- Beck, B.F., 1986. A generalized genetic framework for the development of sinkholes and karst in Florida, USA. *Environmental Geology and Water Sciences*, 8(1-2): 5-18. <https://doi.org/10.1007/BF02525554>
- Bondesan, A., Meneghel, M., Sauro, U., 1992. Morphometric analysis of dolines. *Int. J. Speleol.*, 21(1-4): 1-55. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.21.1.1>
- Carbonel, D., Rodríguez, V., Gutiérrez, F., McCalpin, J. P., Linares, R., Roqué, C., Zarroca, M., Guerrero, J., Sasowsky, I., 2014. Evaluation of trenching, ground penetrating radar (GPR) and electrical resistivity tomography (ERT) for sinkhole characterization. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(2): 214-227. <https://doi.org/10.1002/esp.3440>
- Carrasco Martín, A., Rovira-Medina, J.J., Mudarra-Martínez, M., Cifuentes Sánchez, V.J., González Rojas, D., Andreo-Navarro, B., 2023. Resultados preliminares de la red de pluviómetros totalizadores instalados en la Sierra de Segura (provincias de Granada y Jaén). Implicaciones para la evaluación de los recursos hídricos subterráneos. *XI Simposio del Agua en Andalucía 2023*, Granada. <https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/28051>
- Clements, C.B., Whiteman, C.D., Horel, J.D., 2003. Cold-air-pool structure and evolution in a mountain basin: Peter Sinks, Utah. *Journal of Applied Meteorology*, 42: 752-768. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2003\)042<0752:CSAEIA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2003)042<0752:CSAEIA>2.0.CO;2)

- Cvijić, J., 1893. *Das karstphänomen: Versuch einer morphologischen monographie*. Vienna, Austria: Albrecht Penck.
- Cvijic, J., 1918. Hydrographie souterraine et évolution morphologique du karst. *Revue de Géographie Alpine*, 6(4): 375-426. <https://doi.org/10.3406/rga.1918.4727>
- Dabrio, C. J., 1973. *Geología del sector del Alto Segura. (Zona Prebética)*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada.
- Dorninger, M., 2016. Topografische Und Meteorologische Faktoren Für Extrem Tiefe Temperatur-minima in Kaltluftseen. *Promet* 98: 43–58. <https://d-nb.info/1150441666/34>
- Dozier, J., Frew, J. 1990. Rapid calculation of terrain parameters for radiation modeling from digital elevation data. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 28(5): 963-969. <https://doi.org/10.1109/36.58986>
- Eslava Ramírez, J. A., Bahamon, A., Sandra, M., Lopez, R. M. I., 2000. Climatic classification of the Karst. *Meteorologia Colombiana*, 2: 67-72.
- Espín Sánchez, D., Conesa García, C., Olcina Cantos, J., 2021. Polos fríos en el Calar de Hernán Pelea y Cabrilla (Jaén, España), factores sinópticos y de microescala. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles (BAGE)*, 90. <https://doi.org/10.21138/bage.3140>
- Espín Sánchez, D., Ruiz Álvarez, V., Martí Talavera, J., García Marín, R., 2018. Estudio preliminar de las inversiones térmicas en el sureste de la Península Ibérica: El caso de los campos de Hernán Perea. *Pirineos*, 173: e036. <https://doi.org/10.3989/pirineos.2018.173003>
- Ford, D. C., Williams, P. W., 1989. *Karst geomorphology and hydrology*. London, UK: Unwin Hyman. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-7778-8>
- Foucault, A., 1971. Le Jurassique dans la partie orientale des zones externes des Cordillères Bétiques: le prébetique et le subbetique de Cazorla à Huescar. *Cuadernos de Geología Ibérica*, (2): 137-156.
- García Prieto, F., 1991. Criterios de clasificación morfométrica de campos de dolinas. *Cuaternario y Geomorfología*, 5: 65-76.
- Gómez-Zotano, J., Alcántara-Manzanares, J., Martínez-Ibarra, E., Olmedo-Cobo, J.A., 2016. Applying the technique of image classification to climate science: the case of Andalusia (Spain). *Geographical Research*, 54(4): 461-470. <https://doi.org/10.1111/1745-5871.12180>
- Gracia, F. J., 1987. Controles morfométricos de los campos de dolinas en el sector central de la Cordillera Ibérica. *Cuaternario y Geomorfología*, 1(1-4): 119-134.
- Gutiérrez, M., Peña J.L., 1979. El karst en los Llanos de Pozondón (Sierra de Albarracín). *Teruel: revista de estudios Turolenses*, 61-62: 39-46.
- Iijima, Y., Shinoda, M., 2000. Seasonal changes in the cold-air pool formation in a subalpine hollow, central Japan. *International Journal of Climatology*, 20(12): 1471-1483. [https://doi.org/10.1002/1097-0088\(200010\)20:12<1471::AID-JOC554>3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/1097-0088(200010)20:12<1471::AID-JOC554>3.0.CO;2-6)
- Jennings, J.N., 1987. *Karts geomorphology* (2 Ed.) Oxford, UK: Blackwell.
- Jerez Mir, L., 1971. Bosquejo estratigráfico y paleogeográfico de la Zona Prebética en la región de Isso - Elche de la Sierra - Moratalla prov. de Albacete y Murcia). *Bol. Geol. Min.* 81(2): 117-131.
- Jiménez, M.A., Ruiz, A., Cuxart, J., 2015. Estimation of cold pool areas and chilling hours through satellite-derived surface temperatures. *Agricultural and Forest Meteorology*, 207: 58-68. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.03.017>
- Land, L., 2013. Geophysical records of anthropogenic sinkhole formation in the Delaware Basin region, southeast New Mexico and west Texas, USA. *Carbonates and Evaporites*, 28(1-2): 183-190. <https://doi.org/10.1007/s13146-013-0126-9>

- Litschauer, D., 1962. Untersuchung der Entwicklung von Kaltluftseen in Dolinen-und Becken-lagen (Investigation of the development of cool air pools in sinkholes and basins). Ph.D. dissertation, University of Vienna, 129 pp.
- López Bermúdez, F., 1974: El karst del Calar del Mundo (Albacete). *Rev. Estudios Geográficos*, 136: 359-404.
- López Bermúdez, F., López Limia, B., 1989. Geomorfología del karst Prebético (Cordilleras Béticas). En J.J Durán y J. López Martínez (eds.), *El karst en España*. Madrid, España: Sociedad Española de Geomorfología. 187-200 pp.
- López Garrido, Á.C., 1971. *Geología de la Zona Prebética al NE de la Provincia de Jaén*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada.
- López Limia, B., 1986. Dos campos de dolinas en la Sierra de Segura, ensayo de distribución espacial. En *Actas del Congreso Internacional de Espeleología*. Madrid.
- López Limia, B., 1987. *Geomorfología del Karst de Pinar Negro: Sierra de Segura– Jaén*. Tesis Doctoral, Universidad de Murcia.
- López Limia, B., López Bermúdez, F. L., 1985. Tipos de lapiaz en un karst mediterráneo de montaña (sierra de Segura, Jaén). *Papeles de Geografía*, 10: 21-32.
- López Limia, B., López Bermúdez, F. L., 1998. Morfología kárstica del sector oriental del Prebético andaluz. En J. J. Durán Valsero, J. López Martínez (Eds.), *Karst en Andalucía*. Madrid, España: Instituto Tecnológico Geominero de España. 145-152 pp.
- Lundquist, J.D., Pepin, N., Rochford, C., 2008. Automated algorithm for mapping regions of cold-air pooling in complex terrain. *Journal of Geophysical Research*, 113: D22107. <https://doi.org/10.1029/2008JD009879>
- Marks, D., Dozier, J., 1979. A clear sky longwave radiation model for remote alpine areas. *Archiv für Meteorologie und Bioklimatologie*, 27: 159-187. <https://doi.org/10.1007/BF02243741>
- Martín Escorza, C., 1991. Alineamientos preferentes en el campo de dolinas de Villar del Cobo (Teruel). *Geogaceta*, 10: 143-145.
- Morais, F., Soriano, M.A., 2017. Análisis morfométrico de dolinas y parámetros geofísicos aplicados al estudio de los flujos de agua subterránea en la cuenca del Ebro, Zaragoza, España. *Geociências*, 36(2): 221-232. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v36i2.10892>
- Moral Martos, F., 2005. *Contribución al conocimiento de los acuíferos carbonáticos de la Sierra de Segura (Alto Guadalquivir y Alto Segura)*. Tesis Doctoral, Universidad Pablo de Olavide.
- Moral Martos, F., 2019. La altiplanicie kárstica de la Sierra de Segura: el mayor torcal de la Cordillera Bética. *Boletín de la Sociedad Española de Espeleología y Ciencias del Karst*: SEDECK, 13: 34-46.
- Moral Martos, F., Fernández Díaz, P., Rodríguez Rodríguez, M., 2005. Hidrología, usos del agua y nuevas amenazas para los recursos hídricos en Sierra Seca (cuenca alta de los ríos Castril y Guardal, Granada): un caso paradigmático. En J.A. López-Geta, J.C. Rubio Campos, M. Martín-Machuca (Eds.), *VI Simposio del agua en Andalucía*. Madrid, España: Instituto Geológico y Minero de España. 869-880 pp.
- Moral, F., 1992. *Estudio hidrogeológico de la Unidad del Espino (Sierra de Segura, Jaén)*. Tesis de Licenciatura. Universidad de Granada.
- Oke, T.R., 2000. *Boundary Layer Climates*. New York, USA: Taylor & Francis.
- Otero, F.A., 1998. Historia y desarrollo de las investigaciones sobre el modelado kárstico en Andalucía. En J.J Durán y J. López Martínez (Eds.) *Karst en Andalucía*. Madrid, España: Instituto Tecnológico Geominero de España. 21-29 pp.

- Palmquist, R., 1979. Geologic controls on doline characteristics in mantled karst. *Z Geomorph Suppl Bd*, 32: 90-106.
- Pardo-Igúzquiza, E., Durán Valsero, J.J., Robledo Ardila, P. A., 2016. Modelado fractal de la distribución del tamaño de dolinas en el macizo kárstico de la Sierra de las Nieves (Málaga, España). *Cuaternario y Geomorfología* 30(1-2): 61-73. <https://doi.org/10.17735/cyg.v30i1-2.41318>
- Pezzi M.C., 1977: *Morfología kárstica del sector central de la Cordillera Subbética*. Granada, España: Universidad de Granada.
- Planchon O., Darboux F., 2001. A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models. *Catena*, 46: 159-176. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00164-3](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00164-3)
- Pope, D., Brough, C., 1996. *Utah's Weather and Climate*. Salt Lake City, USA: Publishers Press.
- Renon, B., 2011. Le fabbriche naturali del freddo. Dipartimento Regionale per la Sicurezza del Territorio. ARPAV, 46 pp. https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/climatologia/file-e-allegati/documenti/articolo-doline_new.pdf/@display-file/file.
- Reynolds, J.M., 2011. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, Second edition. Chichester, UK: Wiley-Blackwell, John Wiley and Sons.
- Rico, V.J., Rubio, G.A., 1997. Los macrolíquenes del macizo del Calar del Mundo (Albacete) y de la Sierra de Segura (Jaén, España). *Lazaroo*, 18: 45-93.
- Rodríguez Estrella, T., 1979. El sistema hidrogeológico del Calar del Mundo. En: *Simposio Nacional de Hidrogeología*, Valencia, 317-338 pp.
- Rodríguez Estrella, T., Ballesta Sánchez, F., 1999. *Estudio geohidroespeleológico del Calar del Mundo: (provincias de Albacete y Jaén)*. Albacete, España: Instituto de Estudios Albacetenses "Don Juan Manuel".
- Rodríguez Vidal, J. 1983. Geomorfología de las Sierras Exteriores oscenses y su piedemonte. *Colección de Estudios Altoaragoneses*, 4: 29-71.
- Romero Díaz, M.A., 1985. El karst de Sierra Guillimona (Cordilleras Béticas). *Papeles de Geografía (Física)*, 10: 5-19.
- Rovira-Medina, J.J., Carrasco Martín, A., De la Torre Martínez, B., Martín-Rodríguez, J. F., Mudarra-Martínez, M., Cifuentes Sánchez, V.J., Andreo-Navarro, B., 2023. Caracterización hidrodinámica preliminar, recursos hídricos subterráneos y balance hidrogeológico de la Zona Central de la sierra de Segura (Provincia de Jaén) para el año hidrológico seco 2021/22. XI Simposio del Agua en Andalucía 2023, Granada. https://www.riuma.uma.es/xmlui/bitstream/handle/10630/28045/Rovira%20et%20al_SIAGA23.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Sánchez Fabre, M., Peña Monné, J.L., Lozano Tena, M.V., Moya Medina, C., 2010. Los campos de dolinas de la Sierra de Albarracín. En Peña Monné J.L., Sánchez Fabre M., Lozano Tena M.V. (eds.) *Las formas del relieve de la Sierra de Albarracín*, Teruel, España: Centro de Estudios de la Comunidad de Albarracín (CECAL). 89-110 pp.
- Sauro, U. 2016. Dolines and sinkholes: aspects of evolution and problems of classification. *Acta carsologica*, 32(2): 41-52. <https://doi.org/10.3986/ac.v32i2.335>
- Schmidt, W., 1930. Die tiefsten Minimumtemperaturen in Mitteleuropa. *Die Naturwissenschaften*, 18: 367-369.
- Singh, U.K., Das, R.K., Hodlur, G.K. 2004. Significance of Dar-Zarrouk parameters in the exploration of quality affected coastal aquifer systems. *Environmental Geology*, 45(5): 696-702.
- Smith, S.A., Brown, A.R., Vosper, S.B., Murkin, P.A., Veal, A.T. 2010. Observations band simulations of cold air pooling in valleys. *Boundary-Layer Meteorology*, b134(1): 85-108. <https://doi.org/10.1007/s10546-009-9436-9>

- Srinivas, Y., Hudson Oliver, D., Stanley Raj, A., Muthuraj D., Chandrasekar N., 2012. Estimation of conductance anomalies in subsurface through Dar-Zarrouk parameters by resistivity inversion method. *International Journal of Physical and Mathematical Sciences*, 3(1): 140-151.
- Summerfield, M.A. 1991. *Global geomorphology: an introduction to the study of landforms*. Essex, UK: Longman Group Ltd.
- Sweeting, M. M. 1972. *Karst Landforms*. London, UK: Macmillan.
- Valois, R., Camerlynck, C., Dhemaied, A., Guerin, R., Hovhannissian, G., Plagnes, V., Robain, H. 2011. Assessment of doline geometry using geophysics on the Quercy plateau karst (South France). *Earth Surface Processes and Landforms*, 36(9): 1183- 1192. <https://doi.org/10.1002/esp.2144>
- Whiteman, C.D., Haiden, T., Pospichal, B., Eisenbach, S., Steinacker, R. 2004. Minimum temperatures, diurnal temperature ranges, and temperature inversions in limestone sinkholes of different sizes and shapes. *Journal of Applied Meteorology*, 43(8): 1224-1236. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<1224:MTDTRA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<1224:MTDTRA>2.0.CO;2)
- Whiteman, C.D., Zhong, S., Shaw, W.J., Hubbe, J.M., Bian, X., Mittelstadt, J., 2001. Cold pools in the Columbia Basin. *Weather and Forecasting*, 16(4): 432-447. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2001\)016%3C0432:CPITCB%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2001)016%3C0432:CPITCB%3E2.0.CO;2)