

INVESTIGACIONES DE ADOLFO ERASO EN OJO GUAREÑA Y ATAPUERCA Y SÍNTESIS DEL CONOCIMIENTO ACTUAL DEL KARST EN AMBAS ZONAS

Ana Isabel Ortega Martínez^{1, 2, 3}, Miguel Ángel Martín Merino³

¹ Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (CENIEH)

² Fundación Atapuerca

³ Sociedad Española de Espeleología y Ciencias del Karst (SEDECK)

INTRODUCCIÓN

Adolfo Eraso mantuvo una intensa relación con Ojo Guareña (OG) durante toda su carrera científica. Fue él quien publicó la primera visión de conjunto del karst, quien abrió los ojos respecto a la relación del acuífero kárstico con la tectónica local y el que publicó la primera hipótesis evolutiva. Posteriormente dirigió los estudios hidrogeológicos y allí fue uno de los primeros lugares en donde aplicó su método de predicción de las direcciones de drenaje. También eligió a OG como su escuela de campo preferida para que sus alumnos de doctorado de la ETSIME se familiarizaran con las peculiaridades de un karst y

asesoró a diferentes administraciones respecto a su protección y divulgación turística. En Atapuerca también colaboró en la aplicación del Método Eraso y en la identificación de antiguas surgencias, así como en el estudio de las paleovelocidades de circulación del agua en el karst. En ambos lugares fue para nosotros un maestro y compañero con el que dimos nuestros primeros pasos y nos animó a continuar investigando.

1. INVESTIGACIONES DE ADOLFO ERASO EN OJO GUAREÑA Y ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

1.1. Introducción al estudio del karst de Ojo Guareña (1965)

La relación de Eraso con OG se remonta a la Expedición Internacional de 1958, organizada por el Grupo Espeleológico Edelweiss (GEE), en la que tuvo una participación destacada en la exploración y topografía (Armengou, 1959, 1964; Martín, 2008; Martín & Ortega, 2022). Años después incluirá en uno de sus primeros artículos científicos algunas observaciones sobre la climática subterránea de OG (Eraso, 1963).

En 1965 publicaría su número monográfico *Introducción al estudio del karst de Ojo Guareña* (Eraso, 1965) (Fig. 1) en el que no solo recopilaba la topografía y el relato de las exploraciones, sino que esbozaba, según su propia definición, sus aspectos geológicos y genéticos, a partir del estudio de las huellas de cavitación que emprendió en 1963.

En el epígrafe de Estratigrafía, asignaba a las calizas de OG una edad Turoniense, al basarse, entre otras fuentes, en la tesis de Ciry (1939), así como en la primera serie de la hoja nº 84 del Mapa Geológico de España del IGME (Sanz, 1959). No sería hasta la publicación de la segunda serie, Magna 50 (Olmo & Ramírez del Pozo, 1978), cuando se reclasificó toda la columna estratigráfica regional, asignándolas al Coniaciense Medio-Superior.

En el epígrafe de Tectónica también hablaba de que el área de OG se encontraba entre una zona más septentrional de vergencia monoclinal sur (Montes del Somo y Valnera) y la gran estructura sinclinal de Villarcayo-Medina de Pomar, que se

desarrollaba meridionalmente con una alineación ONO-ESE. En la zona intermedia Eraso destacaba la alineación sinclinal O-E de Hornillayuso o La Mesa y, en paralelo, el anticlinal de Villamartín-Río Trema (posteriormente denominado por el propio IGME como de Retuerta), relacionando ambos con el diapiro de Gayangos. En esta primera versión del IGME aún no se había identificado la falla de Villamartín, que discurría paralela entre ambos, que años después Eraso describía en sus clases prácticas como falla en tijera que, al poner en contacto las calizas karstificables con las margas impermeables, obligaba a las aguas del acuífero a drenar en sentido ESE. El Diapiro de Gayangos también habría originado la red de fallas tangenciales y radiales que alcanzaban el río Trema, así como las diaclasas que se ajustaban preferentemente a las directrices N-S, E-O y, en menor medida, NO-SE y NE-SO. Afirmaba que todos estos alineamientos, unidos al buzamiento de las capas, proporcionaban las directrices generales hidrológicas que explicaban el funcionamiento del karst.

El capítulo descriptivo de las formas kársticas es, sin duda, el de mayor interés, dado que hasta ese momento prácticamente

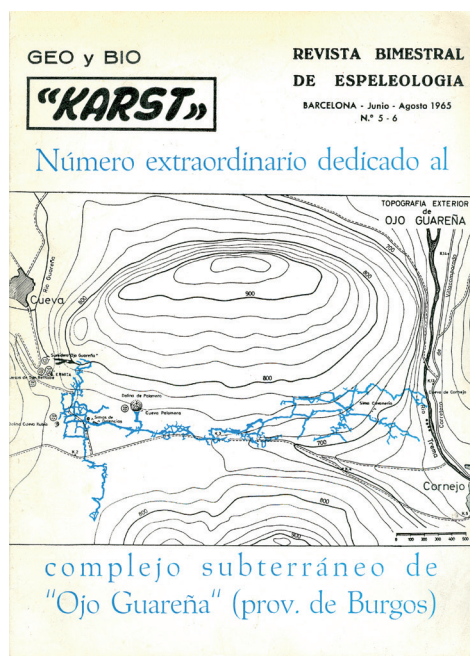


Figura 1 // Portada del trabajo monográfico de Eraso (1965).

todos los artículos sobre OG incidían en el aspecto histórico de los descubrimientos y no abordaban una visión de conjunto, con sus aspectos geológicos y genéticos. Llama la atención que utilice con frecuencia el concepto de funcionamiento «a presión hidrostática», algo habitual en aquellas décadas pero que, años después, él mismo se esforzaba en desterrar del mundo espeleológico (Eraso, 1983: 370), por ser generalmente utilizado de forma incorrecta al describir como «tubo de presión» cualquier conducto de sección redondeada o elíptica, abogando por su sustitución por el de «conducción forzada», más usual entre los hidrogeólogos.

En su descripción del Sistema Palomera-Dolencias, las dos únicas entradas conectadas en aquel momento, ya planteaba muchas observaciones y reflexiones de interés, como el hecho de que en el Sector Este, tras Los Lagos, el conducto Galería Manuel Iradier-Galería de la Esperanza (cuarto nivel) y el eje Galería Estella-Galería Diputación (tercer nivel) discurrían sensiblemente paralelos, hacia el E, pero el primero y más septentrional, a cota sensiblemente más baja, a pesar de que el buzamiento hacia el S, inicialmente habría favorecido su encajamiento en la posición más meridional. Algo que sí ocurre en el Sector Central con el Laberinto Alcoy respecto al Nuevo Paso, o en los conductos previos a Los Lagos que se dirigen hacia el S y SE (San Jordi, Cocentaina, Sedimentos...).

También relacionaba la abundante deposición de sedimentos finos del tramo final de la Galería de la Esperanza, próximo al Sifón Terminal, con las oscilaciones estacionales del caudal del río Trema. Igualmente, describía la colmatación oriental del eje superior (tercer nivel), poco más allá de la base de la Sima de los Huesos (SH) —cuya entrada aún no se había desobstruido en 1965—, con Covaneria. Llamaba la atención sobre el sentido ascendente de las huellas de corriente de la Sima Bartolomé, así como de los conductos inferiores a los que se accede por ella: Galerías Fernández Villa, Galería Battaner y Laberinto Gruyère.

Respecto al Sector Central, la primera observación que apuntaba se refería al anómalo ángulo de incidencia (hacia el SO) del conducto de la Rampa de Palomera en la Sala Edelweiss de la

Galería Principal, así como las dimensiones y altura de esta. Aludía a la importancia de la circulación del aire entre Dolencias y Palomera, con la repercusión en los procesos crioclásticos de caída de lajas en paredes y bóveda por acción del hielo. Incluso en la actualidad, es posible ver en puntuales momentos invernales importantes acumulaciones de hielo en las proximidades de ambas entradas (Figs. 2 y 3), que llegan incluso más allá de la Sala de las Comunicaciones, a 100 m de la base de la Sima Dolencias. Indicaba que la apertura de la Sima de Dolencias era bastante posterior a la formación de sus niveles horizontales y citaba la presencia en el superior (segundo nivel) de cantos rodados de arenisca.

En el Dédalo Oeste destacaba la importancia genética del «Piso Muerto», nivel inactivo superior a los por entonces denominados Primer, Segundo y Tercer Piso (actuales cuarto, quinto y sexto nivel). En el Piso Muerto incluía el conducto superior de la Sima Dolencias y la Galería de los Grabados (segundo nivel), así como la Galería Macarroni (o de los Gours) y la Galería de la Escalada (ambas del tercer nivel).

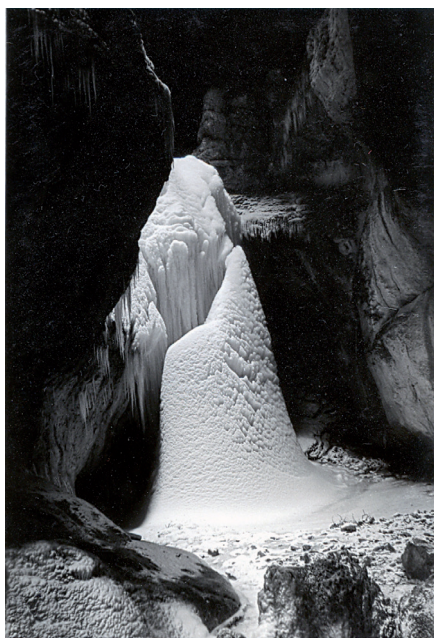


Figura 2 // Gran estalagmita de hielo de 15 m de altura en la base de la Sima Dolencias, en febrero de 1983 (Foto César Liz, Arch. GEE.)

En el Segundo Piso (quinto nivel), originalmente conocido como Laberinto del Despiste y posteriormente como Galería de las Ovejas, nuevamente destacaba las morfologías de cavitación, especialmente las huellas ascendentes de los conductos verticales que sirven de enlace con la Galería del Teléfono (cuarto nivel), aunque años después, durante sus cursos, incidiría más en los bellos ejemplos de acanaladuras originados por el descenso de aguas más frías hacia el colector.

En el Tercer Piso (quinto y sexto nivel) destacaba el hecho de que la Galería de las Charcas mostraba una clara tendencia hacia el E, diferente al actual recorrido del Guareña, predominantemente en sentido N-S, a favor del buzamiento.

También aludía a la importancia genética de la Galería de los Italianos, al comienzo de la Segunda Axial, con su sentido de circulación N-S. Todavía no se había logrado superar el Laberinto Vitoria, que se ubicaba poco antes de cruzar el eje del sinclinal, por lo que se desconocía la importancia real de los conductos, aunque Eraso ya reflexionaba sobre su trazado y funcionalidad.



Figura 3 // Acumulación de hielo en la entrada de Cueva Palomera, en marzo de 2005 (Foto Miguel Á. Martín, Arch. GEE).

Finalmente reflexionaba sobre el hecho de que en algunos tramos de OG fuera frecuente la existencia de conductos superpuestos mientras que, en otros, parecía existir un único conducto. Planteaba dos posibles hipótesis, bien que hubiera tramos obstruidos por colmatación o derrumbamientos, o bien que los niveles superiores se hubieran generado por lo que describía como «erosión directa», partiendo del ascenso de las aguas desde el nivel inferior, en los momentos de mayor caudal, por «chimeneas de equilibrio» (Fig. 4). Incluso consideraba que, en algunos casos, este fenómeno se hubiera visto favorecido por la preexistencia de galerías inactivas formadas en etapas anteriores, lo que describía como «captación inversa», poniendo el ejemplo de la Galería Diputación (Fig. 5).

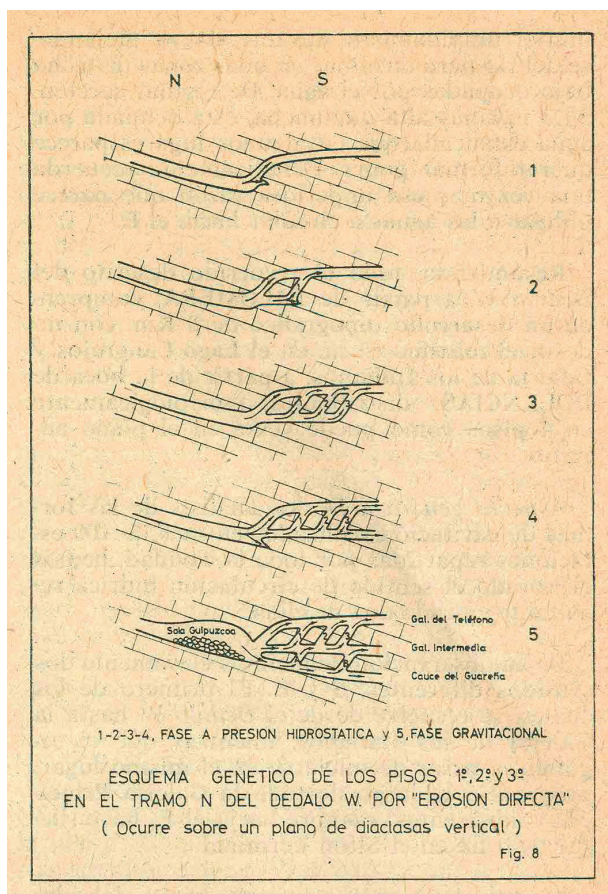


Figura 4 // Modelo genético que proponía Eraso (1965) para la formación de los tres niveles inferiores de OG.

Evidentemente, todas estas hipótesis planteadas por Eraso, representaron un momento inicial en el conocimiento de Ojo Guareña, que se encontraba en una fase preliminar. La exploración estaba en sus prolegómenos y la topografía, precisamente recopilada por él en ese mismo trabajo, distaba mucho de la que se pudo disponer, dos décadas después, con la Monografía sobre Ojo Guareña (G .E. Edelweiss -GEE-, 1986). De hecho, fue él quien nos transmitió personalmente su inquietud por poder disponer de unos buenos perfiles longitudinales de OG. Cuando en 1984 le pasamos copia del primero de ellos, el perfil N-S del Dédalo Oeste que aparecería publicado años después (GEE, 1986: perfil 2 del Atlas Cartográfico), quedó claro que Ojo Guareña se correspondía con un sistema multinivel en donde el encajamiento progresivo de la red hidrográfica externa, concretamente del Guareña, se veía reflejado en el escalonamiento de los conductos en seis claros niveles superpuestos (GEE, 1986; Ortega et al., 2013a).

Por otra parte, los conductos de los cuatro niveles superiores tienen unas secciones mucho mayores que las del quinto y sexto

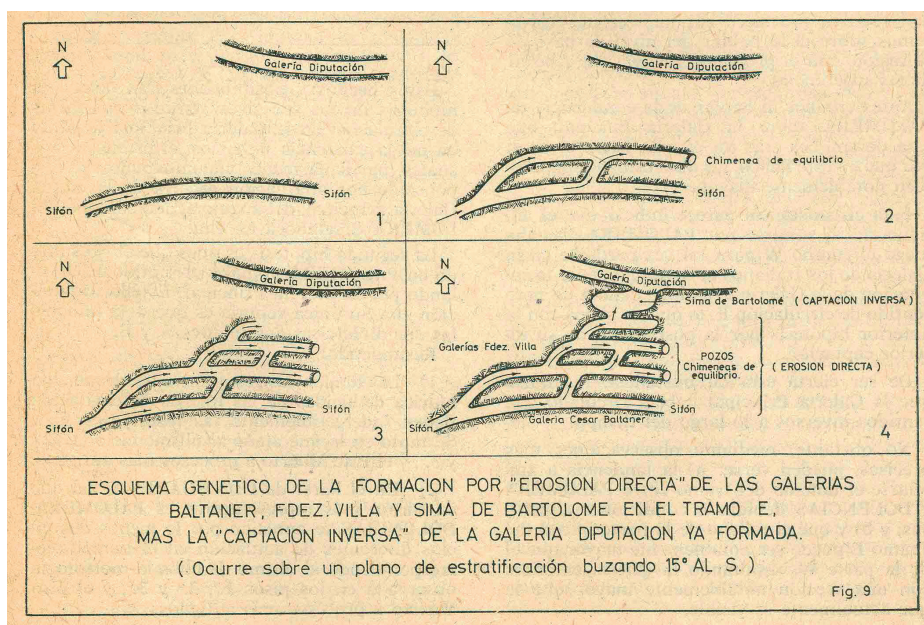


Figura 5 // Modelo genético propuesto por Eraso (1965) para la captación de la Galería Diputación, por parte de los niveles inferiores del Sector Este-Huesos de OG.

nivel, indicativas de que se formaron cuando los volúmenes de agua drenados por los paleosumideros del Guareña correspondían a momentos climáticos muy diferentes. Además, como también apuntaba Eraso, en muchos casos su continuidad está completamente obstruida por depósitos sedimentarios, en unos casos por materiales finos (arcillas, limos y arenas) y en otros por terrazas con cantos, tanto rodados como angulosos. Hoy en día sigue siendo frecuente que, en temporada de lluvias o deshielo, tanto el propio sumidero como los conductos más meridionales del sexto nivel sean incapaces de drenar todo el caudal del Guareña. En el interior de la cavidad eso provoca la rápida subida del nivel freático, sifonando por completo los conductos del sexto nivel y anegando la mayor parte de los del quinto (eje Sala Guipúzcoa-Galería de las Ovejas). Cuando el caudal es aún mayor, la fluctuación del nivel freático llega a alcanzar el cuarto nivel, favorecida además por el hecho de que el arroyo de Villamartín se suma bruscamente por la boca de la Sima Dolencias, aportando un importante volumen de agua directamente a los conductos del cuarto nivel. Pensamos que las huellas de corriente ascendentes que Eraso describía en el Dédalo Oeste nos están marcando este importante proceso de fluctuación que se sigue produciendo con periodicidad estacional.

Incluso en estos últimos años, son cada vez más frecuentes las avenidas excepcionales que provocan que se forme una gran balsa de agua en el exterior, que llega a alcanzar más de 19 metros de altura sobre la cota del Sumidero del Guareña (Fig. 6). En estas ocasiones, parte de las aguas del Guareña se sumen entre el talud que llegó a colmar la mayoría de los paleosumideros de los niveles superiores. Estas grandes avenidas están provocando un rápido proceso de reexcavación en el eje Sala Negra-Galería y Sala del Cacique (Martín, 1986: 147; Ortega et al., 2013a: 112), perteneciente al cuarto nivel pero descubierto en 1969, con posterioridad a la publicación del trabajo de Eraso (1965). En la actualidad, este proceso está siendo objeto de estudio por nosotros (Fig. 7). La frecuencia de estas grandes avenidas y las amplias fluctuaciones del nivel freático de OG no eran conocidas por Eraso cuando redactó este trabajo. De hecho, en sus informes y artículos posteriores ya abandonó sus hipótesis iniciales, incidiendo tan solo en las fluctuaciones del nivel freático y en la

existencia de varias chimeneas de equilibrio en las que fácilmente podían registrarse sus oscilaciones (Eraso et al., 2001a).

Eraso también identificaba a Cueva Palomera y a Cubía con antiguos sumideros. En nuestros trabajos posteriores, basándonos en él, insistíamos en dicha génesis (Martín, 1986a y 1986b; Martín & Ortega, 2001). En ambos casos, los conductos seguían direcciones anómalas para este sector (N-S y NE-SO en Palomera y N-S, E-O y S-N en Cubía), y contaban con reexcavaciones recientes en sus depósitos sedimentarios provocados por las aguas de infiltración canalizadas por sus respectivas dolinas de entrada. En el caso de Palomera, a los dos niveles conocidos desde las primeras exploraciones (Galerías Altas y Rampa de Palomera) se unió un tercero, el de la Sala Keimada, descubierta en 1976, cuyo inicio permanecía colmatado bajo los sedimentos de Cueva Palomera y desembocaba en sentido N-S en el techo de la Sala Edelweiss (Martín, 1986b).



Figura 6 // Riada del 24/01/2019 que formó una gran balsa en el fondo del valle ciego del Guareña (Foto Miguel Á. Martín).

No obstante, Eraso iba más allá en sus conclusiones iniciales y solía asociar a una fase muy antigua la génesis de ambos sumideros. Los definía como paleosumideros del Guareña, situando su cronología relativa en un momento previo al funcionamiento de la Cueva de San Bernabé como sumidero y, por tanto, a su encajamiento en el valle ciego (Eraso, 1965: 27). Hipótesis que, décadas después, seguía transmitiendo a sus alumnos de los cursos de doctorado con los que visitábamos el karst de OG.

El hecho de que no existiera evidencia alguna de cauce entre el borde superior del Circo de San Bernabé y la propia dolina de Palomera, y de que en el borde septentrional de la dolina se conservaran escarpes verticales de media docena de metros de desnivel nos llevó a pensar que su origen pudiera estar relacionado con un colapso que seccionara los conductos de niveles superiores, que sí tuvieran su génesis en antiguos paleosumideros originados en el valle ciego del Guareña (Ortega et al., 2013a: 128-129). Al realizar posteriormente unos perfiles geofísicos ERT, en el eje de la dolina y Rampa de Palomera, se detectó la existencia de otros conductos colmatados en niveles equiparables al tercer y cuarto nivel (Bermejo et al., 2016), que parecían apoyar la hipótesis de un colapso que seccionó los



Figura 7 // Reexcavación en la Galería del Cacique, tras la riada de diciembre de 2021 (Foto Pedro Carazo).

conductos preexistentes. No obstante, otra serie de observaciones y analíticas realizadas posteriormente nos han hecho madurar una nueva hipótesis de génesis, que desarrollaremos en un epígrafe posterior, en la que encajarían todas las evidencias hasta ahora conocidas.

Para finalizar el capítulo descriptivo de las formas kársticas, Eraso aludía al funcionamiento de Covaneria y Cueva Cornejo como antiguas paleosurgencias y de La Torcona, como surgencia temporal en época de grandes avenidas.

En las consideraciones hidrológicas, indicaba que el río Trema, por su capacidad de drenar mayores caudales, fue quien condicionó el nivel de base local, también que el acuífero kárstico estaría jerarquizado por el eje del sinclinal de La Mesa y que el drenaje de las aguas del Guareña forzosamente debería producirse por el flanco sur del sinclinal, relacionando este hipotético eje, que no se descubriría hasta años después, con la surgencia de La Torcona (Plana, 1969 y 1970, Martín, 1986c; Ortega et al., 2013a).

Finalmente hacía una reflexión respecto a los sucesivos ciclos hidrológicos que debieron sucederse en OG, considerando que la etapa más antigua vendría dada por los sumideros de Palomera y Cubía, correspondiendo a esta etapa la surgencia de Covaneria. Para él, los deshielos del macizo de Castro Valnera, en sus diversas fases, que engloba en lo que denomina Ciclo Principal, serían determinantes de los sucesivos episodios causantes del mayor desarrollo de la karstificación. A estos momentos corresponderían el funcionamiento de Cueva Cornejo como surgencia de la Axial Principal y el posterior de La Torcona respecto al eje que posteriormente se definiría como Segunda Axial, con un último encajamiento de los ríos Trema y Guareña, que pasarían a evacuar sus aguas en el cauce del Trema alineados en la Segunda Axial. El colapso de las bóvedas de la Sima Dolencias también correspondería a esta última fase.

En resumen, un extenso y magnífico trabajo en el que, a pesar de que la exploración e investigación de OG estaba en sus inicios, supo condensar la mayor parte de los aspectos de interés que serían desarrollados, tanto por él como por otros autores, en años sucesivos.

1.2. Comportamiento Físico-Químico del Complejo Palomera-Dolencias (1966)

Aunque este nuevo artículo se publicaría al año siguiente (Eraso, 1966), en realidad formaba parte del trabajo que remitió de forma conjunta a los editores de Geo y Bio Karst, como ellos mismos indicaban en el número monográfico de 1965. En él mostraba los resultados de las mediciones climáticas y análisis de aguas efectuadas en 1958 y 1959 en los mismos puntos de muestreo de OG.

Describía que la corriente de aire se limitaba al itinerario entre Palomera y Dolencias (aún no se había desobstruido la SH, cegada artificialmente con losas y troncos por las labores agrícolas). Respecto a los análisis químicos de las aguas destacaba la diferencia en los valores proporcionados por la estación de la Sala Guipúzcoa, cuando las aguas acaban de hacerse subterráneas, y los valores obtenidos en el Sifón Terminal de la Galería de la Esperanza, que lógicamente apuntaban a una mayor permanencia de las aguas en el interior del karst.

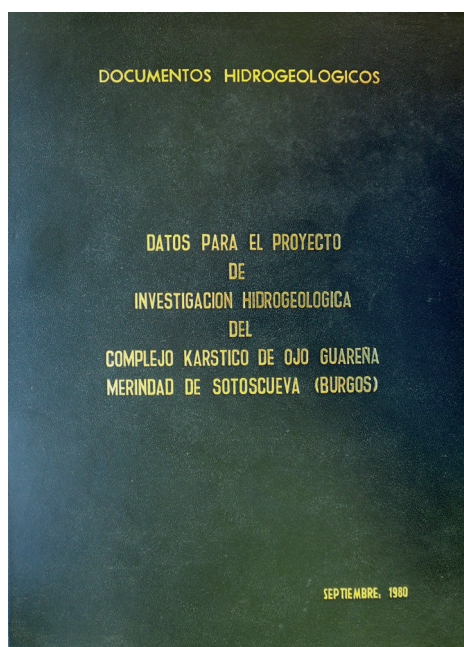


Figura 8 // Portada del Proyecto de Investigación Hidrogeológica de Ojo Guareña (Eraso, 1980), entregado a las administraciones públicas a finales de 1981

1.3. Datos para el Proyecto de Investigación Hidrogeológica del Complejo Kárstico de Ojo Guareña (1980)

Tras un largo paréntesis en sus investigaciones en OG, cuyos motivos ya hemos narrado en otro artículo (Martín & Ortega, 2022), a partir de diciembre de 1977 dirigió las investigaciones del Grupo de Trabajo de Espeleología Científica de la Real Sociedad Española de Historia Natural (GTECRSEHN) que se extendieron en los años sucesivos. En OG se concentraron en el estudio de las huellas de corriente y, especialmente, de los pendants, aunque Eraso no figuraría entre los firmantes del único artículo publicado (Saint Aubin & del Val, 1980). En esos años también comenzó sus labores como asesor de las diferentes administraciones con competencias en la gestión de OG, siendo un ejemplo de ello el Proyecto de Investigación Hidrogeológica (Fig. 8) presentado inicialmente a la Diputación Provincial de Burgos y la Delegación Provincial del Ministerio de Cultura y que años después se presentaría ante la Junta de Castilla y León (Eraso, 1980).

En el citado proyecto concluía que las especiales características de OG facilitaban la posibilidad de realizar una investigación hidrogeológica de su acuífero con relativa facilidad y con un reducido coste. Sus resultados permitirían obtener aplicaciones casi inmediatas respecto a la utilización de las aguas subterráneas en una comarca eminentemente kárstica y con habituales carencias en el suministro durante los meses estivales. También incidía en los recientes corrimientos de la campa de San Bernabé, motivados por las anómalas crecidas del río Guareña. Lamentablemente, ninguna de las administraciones implicadas mostró su apoyo a dichas investigaciones.

1.4. El Karst del Complejo de Cavidades de Ojo Guareña (1986)

En la década de los 80 Eraso seguía coordinando las investigaciones geológicas en OG. A partir de 1982, estuvo asesorando al GEE en las tres coloraciones que finalmente se realizarían entre los años 1984 y 1985. Francisco Ruiz, coordinador de dichos trabajos, le remitió sus resultados para

que fueran incluidos en el artículo de Eraso (1986a) que formaba parte de la Monografía sobre Ojo Guareña publicada aquel año (GEE, 1986). El detalle de aquellas coloraciones lo publicaría, años después, el propio Francisco Ruiz (2002).

En este trabajo Eraso ya pudo actualizar la serie estratigráfica regional según la última hoja geológica publicada por el IGME (Olmo & Ramírez del Pozo, 1978). También incluyó la Falla de Villamartín, que no aparecía en las anteriores cartografías geológicas y que, con dirección ONO-ESE, discurre entre el Sinclinal de La Mesa y el Anticlinal de Retuerta. En sus cursos en OG la definía como una falla en tijera que delimitaba meridionalmente el acuífero kárstico, poniendo en contacto las margas impermeables con las calizas karstificables, y forzaba a que el drenaje se realizara a su favor. Recordemos que en su trabajo de 1965 atribuía este papel delimitador del acuífero al Anticlinal de Retuerta.

También incluía los resultados de la aplicación del Método Eraso en OG. Con este método, intentaba predecir las direcciones de drenaje en cualquier karst, por lo que el primer paso fue aplicarlo en lugares en los que existían buenos estudios previos y se disponía de una buena cartografía. Durante los años anteriores a la publicación, se habían dedicado numerosas jornadas de campo a las observaciones y mediciones de tectoglifos: estrías de fricción de los planos de falla, venas de calcita y estilolitos del interior del macizo. A lo largo de ellas Eraso siempre contó con algunos colaboradores habituales y con el apoyo del GEE. El resultado de la investigación venía a confirmar la gran similitud entre las mediciones de los tectoglifos (como es lógico, tomadas con una brújula) y las direcciones de los conductos topografiados en OG (Eraso, 1986). El único problema es que sus colaboradores se basaron en un plano a escala 1:10.000 de OG (Topografía GEE, montaje F. Ruiz, 1985), aunque no tuvieron en cuenta que sobre él se había aplicado la declinación magnética y tenía la orientación de la cuadrícula UTM que, en aquellos años, se diferenciaba en unos 6° con respecto al Norte magnético (GEE, 1986). Estos resultados también serían incluidos por Eraso en otros dos trabajos publicados por él ese mismo año (Eraso, 1986b y 1986c).

1.5. Mundo Subterráneo. Complejo de Ojo Guareña (1992)

En 1992 apareció publicado, como separata de la revista Tecno Ambiente, un artículo divulgativo sobre Ojo Guareña (Baquero & Eraso, 1992), que posteriormente sería reproducido dentro del libro monográfico Mundo Subterráneo (Baquero & Eraso, 1994) coordinado por Rafael Fernández Rubio.

1.6. Informe Geológico sobre la posible viabilidad turística del Complejo Kárstico de Ojo Guareña (1993)

Eraso también participó, a petición de la Junta de Castilla y León, con uno de los cuatro informes de viabilidad turística (Eraso, 1993) que serían coordinados por uno de nosotros (Ortega et al., 1993). En su desarrollo, intentó convencer a la administración autonómica de la conveniencia de realizar las investigaciones hidrológicas que ya había planteado anteriormente (Eraso, 1980). Proponía la instalación de estaciones de aforo en los cauces del Guareña y Trema, antes de los sumideros, así como en el Trema, después de la zona de descarga. También planteaba la instalación de una estación pluviométrica en las proximidades de la Sima Dolencias, así como de boyas de control del nivel freático en el interior de la cavidad. Volvía a incluir los datos de su anterior trabajo (Eraso, 1986) y planteaba la conveniencia de desarrollar un programa completo de investigación en el Karst de Ojo Guareña y aludía especialmente, antes de proceder a cualquier acondicionamiento, a la necesidad de realizar «un estudio previo y detallado del microclima de todo el complejo subterráneo». Finalmente planteaba un Centro de Interpretación y el acondicionamiento de diferentes rutas, tanto exteriores como interiores, orientadas unas al público general y otras a grupos más especializados.

1.7. Investigación hidroquímica en el acuífero de Ojo Guareña. Repercusiones hidrogeológicas (2001)

Los días 14 y 15 de agosto de 1993, bajo la dirección de Adolfo Eraso, se realizaron dos jornadas intensivas de toma de

muestras de agua y medición de temperaturas en los diferentes sumideros, sifones y resurgencias de OG, con la finalidad de realizar un estudio hidroquímico. Participaron 14 miembros del G. E. Edelweiss, así como cinco del Grupo de Ciencias de la Tierra de la ETSIM y los investigadores de la Universidad de Silesia (Polonia) Jolanta Opolka-Gadek y Bogdan Gadek, que serían los encargados de realizar las analíticas posteriores de las muestras. Los resultados serían presentados en las VI Jornadas Científicas de la SEDECK que se celebraron en junio de 2001 en Espinosa de los Monteros (Burgos), siendo publicados en el Boletín nº 2 de SEDECK (Eraso et al., 2001a).

Los resultados mostraban un aumento creciente en contenido iónico desde los sumideros de los ríos Guareña y Trema hasta las surgencias de El Torcón y km. 8, indicativo del progreso de la disolución de la caliza donde se emplaza el acuífero kárstico. No obstante, en todos los casos se registraban los valores máximos en los sifones de la Galería de los Sedimentos y Sima Bartolomé, ambos ubicados bajo la Axial Principal. Esta aparente anomalía se interpretó que era debida a un mayor tiempo de residencia de las aguas en el acuífero, dado que los flujos subterráneos del Trema y del Guareña son, en ambos casos, en dirección N-S, mientras que el Guareña, una vez rebasado el eje del sinclinal, tiende a circular en sentido ONO-ESE hacia la zona de descarga, por lo que los conductos del acuífero kárstico ubicados en el flanco norte del sinclinal quedarían en un área marginal respecto al drenaje habitual (Eraso et al., 2001a: Fig. 5) (Fig. 9). Al año siguiente, Francisco Ruiz realizaría algunas aportaciones a la figura 5, complementándola con los otros flujos subterráneos ya conocidos, que mejorarían el trabajo inicial (Ruiz, 2002: 29).

En esas mismas Jornadas de la SEDECK también se presentó una actualización de la aplicación del Método Eraso en Ojo Guareña (Eraso et al., 2001d). Adolfo Eraso y Carmen Domínguez habían tomado en los meses anteriores, con apoyo nuestro, nuevas mediciones de los tectoglifos y nuestro compañero Francisco Ruiz había realizado unas mediciones más precisas de las direcciones de los conductos topografiados por el GEE, esta vez teniendo en cuenta la declinación aplicada previamente. El resultado mostraba muchas similitudes con el trabajo

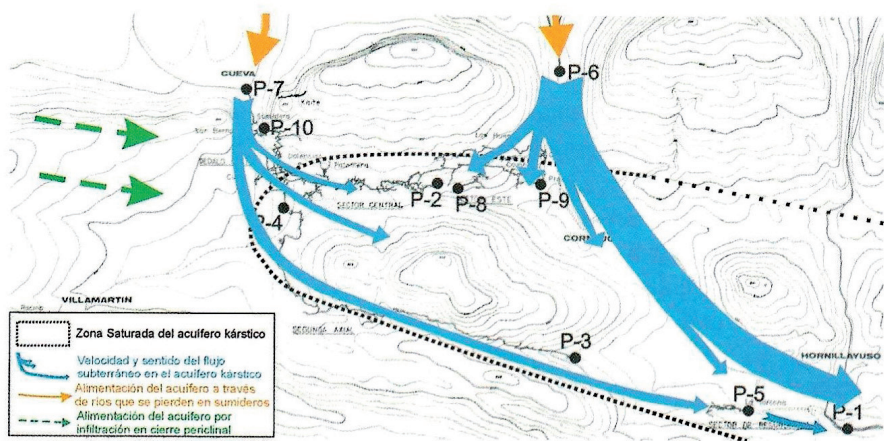


Figura 9 // Alimentación y direcciones de flujo en el acuífero de OG (Eraso et al., 2001a).

anterior (Eraso, 1986), aunque con una ligera desviación entre lo topografiado y la aplicación del método, motivo por el que Eraso prefirió no publicarlo a la espera de una nueva revisión que nunca llegó. También ese mismo año apareció otro artículo suyo (Vallejo & Eraso, 2001), en el que resumía algunos de sus trabajos previos.

A pesar de que en los años sucesivos siguió yendo con frecuencia a OG, ya siempre lo hizo con los alumnos de los cursos de doctorado de la ETSIME, a quienes intentaba formar en estas materias. No obstante, en las dos últimas décadas de su vida, prácticamente todas sus investigaciones se centraron, a través de GLACKMA, en el mundo de los hielos. En 2013 presentamos una nueva monografía sobre OG (Ortega et al., 2013a) en la que reconocíamos la importancia de los trabajos desarrollados por Adolfo Eraso en Ojo Guareña.

2. INVESTIGACIONES DE ADOLFO ERASO EN ATAPUERCA Y ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

2.1 Los homínidos de la Sierra de Atapuerca (1997)

Aunque Eraso había participado de forma esporádica en algunas investigaciones relacionadas con el karst de Atapuerca (Martín & Ortega, 2022), sus años de mayor vinculación comenzaron en

1994, cuando se planteó la realización del estudio geológico y geomorfológico del interior de la cavidad. Durante esos años se estuvieron midiendo tectoglifos, tanto en el interior de la cavidad como en algunas canteras, y las huellas de corriente, para determinar los planos de debilidad y las direcciones preferentes de drenaje, así como la estimación de las paleovelocidades de circulación del agua en el karst.

Un primer esquema sobre las direcciones de drenaje del karst de la Sierra de Atapuerca lo incluyó en el artículo que firmó con los tres codirectores del Equipo de Investigación de Atapuerca (Carbonell et al., 1997) en otro suplemento de la serie Mundo Subterráneo, que coordinaba Rafael Fernández Rubio y apareció publicado en la revista Tecno Ambiente. En ese primer esquema identificaba a la Cueva del Silo como surgencia principal del karst, idea que mantendría en sus trabajos posteriores.

2.2. Estimación de las paleovelocidades y sentidos de circulación del agua y Ley de distribución de planos de debilidad en el karst de la Sierra de Atapuerca (1998)

Ese mismo año de 1997 tuvo lugar la 23ª Sesión Científica de la Sociedad Geológica de España (SGE) en la que se presentaron dos comunicaciones científicas, en las que participábamos, sobre las investigaciones que había coordinado Eraso en Atapuerca durante los años anteriores, que aparecerían publicadas en el nº 23 de Geogaceta, editado al año siguiente (Eraso et al., 1998a y 1998b). Los resultados también se presentaron en las II Jornadas Científicas de la SEDECK celebradas en torno a Atapuerca (1999) y serían republicados de nuevo, con algunas mejoras, en el Boletín nº 2 de la SEDECK (Eraso et al., 2001b, 2001c).

El trabajo sobre la distribución de los planos de debilidad (Eraso et al., 2001b) mostraba su agrupamiento en torno a seis direcciones principales que, a su vez, coincidían o eran contiguas a las cuatro direcciones principales topografiadas en las cavidades por el GEE (Martín et al., 1981).

El trabajo sobre los sentidos de circulación y paleovelocidades identificó el funcionamiento como surgencia del conducto

Dolina-Penal, cuyas huellas de corriente son claramente visibles en la pared sur, en ambos extremos de La Trinchera. También se observaron abundantes huellas de corriente ascendentes en Cueva del Silo, que permitieron identificarla como surgencia del Sistema Cueva Mayor-Cueva del Silo. No obstante, las huellas de corriente eran escasas y poco concluyentes, con la excepción de las que marcaban claros sentidos ascendentes. Al trabajo le faltó algo más de dedicación y una discusión interdisciplinar que habría permitido afinar mucho mejor sus conclusiones.

Años después, con Eraso ya plenamente dedicado a sus estudios en los hielos polares, proseguimos nuestras investigaciones dentro del EIA, identificando al karst de Atapuerca como un sistema multinivel, con tres paleoniveles escalonados discurriendo en paralelo a la ladera SO de la Sierra de Atapuerca. De hecho, ya en nuestro primer trabajo, sin la presencia de Eraso, sobre la morfogénesis del karst, nos empezamos a cuestionar algunas de las conclusiones anteriormente publicadas con él (Ortega, et al 2005). Finalmente, la hipogénesis se reveló fundamental en el origen de la karstificación, con un ascenso de las aguas hasta que alcanzaban el correspondiente nivel freático marcado por el río Arlanzón para, a partir de ese momento, discurrir en sentido NNO hacia las diferentes bocas surgentes funcionales en cada etapa evolutiva del karst (Ortega, 2009; Ortega et al., 2011, 2012b, 2013b, 2014 y 2018).

3. SÍNTESIS DEL ACTUAL CONOCIMIENTO GEOLÓGICO Y EVOLUTIVO DE OJO GUAREÑA

3.1. Geología y Geomorfología

Tras la publicación de la segunda serie del Mapa Geológico Nacional del IGME o Magna 50, concretamente de su hoja 84 correspondiente a Espinosa de los Monteros (Olmo & Ramírez del Pozo, 1978), las calizas y calizas dolomíticas en las que se desarrollan la mayor parte de la karstificación de Ojo Guareña quedaron adscritas al Coniaciense Medio-Superior. Estas reposan sobre un paquete de margas y calizas arcillosas del Turoniense y Coniaciense Inferior que actúa de sustrato

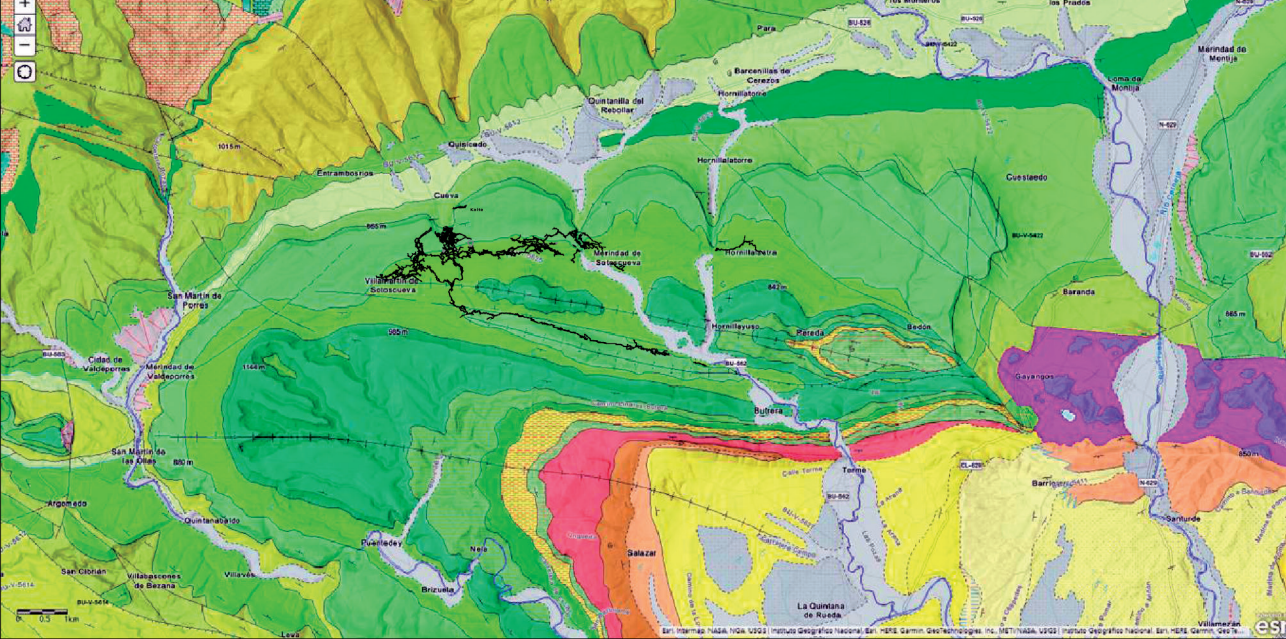


Figura 10 // Mapa Geológico de España Continuo (GEODE) del IGME, a escala 1:50.000, del Karst de Ojo Guareña

impermeable. Por encima de las calizas coniacienses reposan las calizas arcillosas y margas del Santoniense Inferior, por lo general, también impermeables. Como hemos visto, a partir del trabajo insertado por Eraso (1986) en la segunda monografía sobre OG (GEE, 1986), también quedó así definido y nosotros mismos le dimos continuidad en una tercera obra monográfica (Ortega et al., 2013a), tras no haber habido modificaciones en la última versión en línea del Mapa Geológico de España Continuo (GEODE) del IGME (Robador et al., 2022) (Fig. 10).

Esa misma memoria de la hoja geológica del IGME, al hablar de las grandes directrices tectónicas regionales de la cobertera mesozoica, indicaba que eran un reflejo superficial de fracturas profundas del zócalo herciniano, evidenciando que la gran cuesta coniaciense de más de 80 km, que se extiende entre Ojo Guareña y la Sierra de Badaya evolucionaba en paralelo al alineamiento, más septentrional, de las emergencias diapíricas de Mena, Orduña y Murguía. Mientras tanto, los diapiros de Gayangos-Salinas de Rosío y de Añana, emergen en paralelo a los anteriores, más meridionalmente, pero ya en relación con dos grandes cubetas sedimentarias terciarias: los sinclinales de Villarcayo y Miranda de Ebro.

Todas estas emersiones diapíricas ocasionaron una red radial de fracturas y pliegues que afectaron a los macizos calcáreos circundantes. El diapiro de Gayangos generó en la zona plegada del río Trema, en menos de un kilómetro, el Sinclinal de La Mesa, la Falla de Villamartín y el Anticlinal de Retuerta, que discurren en paralelo en dirección ONO-ESE. Ya hemos comentado que fue Eraso el primero en mostrar la importancia que estas estructuras tectónicas tuvieron en la implantación del acuífero kárstico de OG (Eraso, 1965 y 1986; Ortega et al., 2013a).

También hemos hablado de la estructura monoclinal, el relieve de cuestras, que caracteriza a la región en que se enmarca el Karst de Ojo Guareña. Su vertiente septentrional es abrupta, con escarpes que coronan taludes de fuerte pendiente, mientras que la vertiente meridional es bastante suave, con buzamientos generalmente inferiores a 15°. Como suele ser habitual, el frente de cuesta —el escarpe o cortado— está constituido por estratos calizos más duros y resistentes a la erosión, que reposan sobre otros más blandos, a menudo margosos o deleznales, que forman los taludes. El reverso de la cuesta marca la pendiente estructural y está conformado por el estrato calcáreo, pues la capa suprayacente, más deleznable ha ido retrocediendo por la erosión.

En OG, el frente y el reverso de la cuesta está marcado por las calizas coniacienses, mientras que las margas y calizas arcillosas santonienses ocupan el fondo de la depresión sinclinal, sobre la que se eleva el cerro testigo de La Mesa. Todas las precipitaciones que caen sobre las calizas coniacienses, rápidamente se infiltran debido a su intensa karstificación. Mientras tanto, las caídas sobre las margas discurren formando arroyos hasta que, en el contacto con las calizas, suelen encontrar un sumidero, como ocurre actualmente con el arroyo de Villamartín y la Sima Dolencias.

La vertiente sur de los Montes del Somo, a su vez, marca el reverso de otra serie de cuestras más antiguas y elevadas, formadas por rocas silíceas e impermeables, por lo que todas las aguas de lluvia o deshielo que discurren por ellas descenderán hasta la depresión de Sotoscueva y acabarán alimentando el acuífero

kárstico de OG, ya sea infiltrándose por el Guareña, por el Trema, o por el arroyo de La Hoz

3.2. La evolución de la karstificación de Ojo Guareña

En la evolución del karst de Ojo Guareña tiene una importancia fundamental el gran aparato glaciar del Valnera que se extendía por toda la divisoria provincial con Cantabria y alcanzaba hasta la vertiente sur de los Montes del Somo, como ya preveía Eraso en su monografía inicial, relacionando las fases más antiguas de OG con los diferentes episodios del glaciario de los Montes de Valnera (Eraso, 1965). Sus lenguas glaciares principales discurrían hacia el Norte, por los valles cántabros del Pas, Miera, Asón y Gándara. Hacia el sur, eran los valles de La Engaña y, sobre todo, del Trueba, los que drenaban una buena parte de la ablación glaciar del Valnera, como han puesto de relieve las investigaciones, referentes a la última glaciación, encabezadas por el equipo de Enrique Serrano (Serrano, 1995 y 1996; Serrano & Gutiérrez, 2002; Serrano et al., 2011).

En anteriores episodios glaciares, las lenguas más meridionales asomarían por las cumbres de los Montes del Somo hacia el Valle de Sotoscueva, conservándose importantes retazos de sus morrenas, como es el caso de la ubicada en torno a la Cascada Salceda, aguas arriba de Quisicedo. En sus fases iniciales, ese importante drenaje meridional a través del Valle de Sotoscueva, también acabaría por alimentar las aguas del Trueba, en torno al actual Espinosa de los Monteros, mientras que, paralelamente, el frente de las cuestas sotoscuevenses, el escarpe o cortado, iba retrocediendo cada vez más hacia el Sur (Ortega et al., 2013a).

3.3. La karstificación inicial

La fase más antigua de karstificación de OG, relacionada con la formación de los primeros niveles de base, correspondería a la de las calizas santonienses del escarpe de Peña Dulla, localizadas a cotas superiores a los 1100 m s.n.m.

Las calizas de la unidad coniaciense, en la que propiamente se enmarca el acuífero kárstico de OG, también presentan cotas superiores a los 1000 m s.n.m. en ambos extremos del macizo, en torno al páramo de Bedón y al de Villamartín, ya en las inmediaciones del Pelada. En sus proximidades, la ortofoto permite seguir claramente una alargada depresión, en sentido NNE-SSO, que se inicia frente a La Parte de Sotoscueva, a unos 980 m s.n.m. y 230 m sobre su perpendicular en el Valle de Sotoscueva, y evoluciona en paralelo al actual curso del Engaña hasta el arco natural conocido como El Ventanón o Puente de la Horadada, que domina el escarpe al Este de la población de Rozas. Se trata de una forma residual, una antigua paleosurgencia que drenaría las aguas procedentes de la vertiente sur de los Montes del Somo hacia el primitivo Engaña (Fig. 11). Una función similar debió representar Cueva Ñejuelos, localizada en el mismo escarpe, un poco más al NE de El Ventanón (Ortega et al., 2013a).



Figura 11 // El Ventanón o Puente de La Horadada, forma residual de un antiguo conducto que vertería sus aguas hacia el primigenio río Engaña en un momento inicial de la karstificación de OG (Foto Miguel Á. Martín).

Theodoros Karampaglidis, en su estudio preliminar sobre la evolución geomorfológica del valle de Sotoscueva, identifica dos rellanos estructurales. Al primero, o RE1, situado 4 km al Este de El Ventanón y a cotas de 210 m sobre el actual valle, lo relacionó con fases del Plioceno y al segundo rellano, o RE2 (+185 m), con las fases iniciales del Pleistoceno Inferior (Karampaglidis, 2011). Lo que permitía correlacionar la depresión del Pelada y sus paleosurgencias de El Ventanón y Ñejuelos con el nivel RE1 y el Plioceno (Ortega et al., 2013a).

No obstante, un reciente estudio ha aportado nueva información sobre la secuencia fluvial del Alto Ebro, en el que se enmarca el karst de OG, caracterizada por 22 niveles de terrazas, datadas en los últimos 1,25 millones de años (Ma). Los dos niveles más elevados, T1 (+203) y T2 (+190), corresponderían a terrazas erosivas que marcan claros niveles de encajamiento del Alto Ebro, atribuidas a las fases centrales del Pleistoceno Inferior (Benito-Calvo et al., 2021), lo que sugiere una nueva cronología, en torno a 1,25 Ma, para la formación de la depresión del Pelada y las paleosurgencias de El Ventanón y Ñejuelos.

El Valle de Sotoscueva continuó vinculado a la red hidrográfica del Trueba, hacia el que vertería sus aguas por el extremo oriental del valle, en una fase anterior al encajamiento, hacia el S, y la formación del valle ciego del Guareña. La Cueva de Kaite representa el momento inicial de la captura de las aguas del primitivo río Guareña (Fig. 12). Su bóveda evoluciona horizontalmente a 845 m s.n.m., apenas a 5 m bajo la superficie, colgada a 140 m sobre el actual curso del Guareña a la altura del pueblo de Cueva. Según la nueva secuencia del Alto Ebro, el paleonivel de Kaite se situaría entre los niveles de las terrazas T4 (+146) y T5 (+133), cuya cronología se estima en torno a 1,17 y 1,11 Ma (Benito-Calvo et al., 2021).

Los ríos Trema, Guareña y el arroyo de La Hoz comenzaron a encajarse hacia el Sur, formando cursos de agua cataclinales, a favor del buzamiento de la estructura de cuevas calcáreas, en cuyos cauces se sucedían los sumideros hasta la pérdida total de las aguas. Mientras tanto, el río Trueba continuó su evolución, dejando colgado y aislado al Valle de Sotoscueva. El propio retroceso del escarpe motivó la creación del valle ciego

del Guareña, o Circo de San Bernabé, provocando la desaparición de muchos de los antiguos sumideros y de los primeros cientos de metros de la mayoría de sus galerías. Este valle presenta una anchura de más de 500 m en su parte inicial y de 375 m en su fondo, para un retroceso del frente del escarpe de unos 420 m.

Vestigio de uno de los momentos más antiguos de la formación del valle ciego sería la Cueva de San Tirso, abierta a 788 m de altitud, a unos 115 m por encima del curso del río Guareña, en su perpendicular. Su génesis implica la existencia de un nivel freático situado a una cota más elevada que el fondo de la depresión sinclinal y por encima de la ubicación de Villamartín de Sotoscueva (Ortega et al., 2013a). Este conducto se corresponde aproximadamente con el rango de cotas de la T6 (+118/123) y T7 (+111/115), a las que se atribuye una edad de 1,05 y 1,02 Ma (Benito-Calvo et al., 2021) (Fig. 13).

La red hidrográfica del valle sotoscueveno estaría unos 115 m más elevada y la orografía de la citada depresión sinclinal también sería sensiblemente más alta, con las margas santonienses



Figura 12 // La Cueva de Kaite fue un antiguo sumidero del primitivo río Guareña, antes de su encajamiento hacia el fondo del valle ciego. Se abre muy por encima de los conductos de la red principal de OG (Foto Miguel Á. Martín).

recubriéndola en su práctica totalidad y con un drenaje superficial hacia el primigenio río Trema. El acuífero kárstico formado en las calizas coniacienses a favor del eje del sinclinal, tal vez ya habría comenzado a evolucionar, al menos con conductos incipientes, dado que la infiltración directa sería escasa y los caudales del Guareña no serían muy notorios, a juzgar por la moderada sección del conducto de la Cueva de San Tirso y la ausencia de otros pasajes en cotas equiparables.

3.4. Karstificación de la red principal

Ya hemos explicado que, en torno al Sinclinal de La Mesa, se instaló un acuífero kárstico del que se han topografiado 110 km de conductos en su red principal y otra decena de kilómetros en cavidades que, en la actualidad, permanecen sin conectar. Por su flanco norte evoluciona la Axial Principal, que canalizó la mayor parte del flujo hídrico que discurría por los cuatro paleoniveles más elevados. Por su flanco sur evoluciona la Segunda Axial que, si bien comenzó a drenar la última fase de los flujos del cuarto nivel, parece haber jerarquizado la mayor parte del drenaje del Guareña a partir de la formación del quinto y sexto nivel (Fig. 14) (Ortega et al., 2013a).

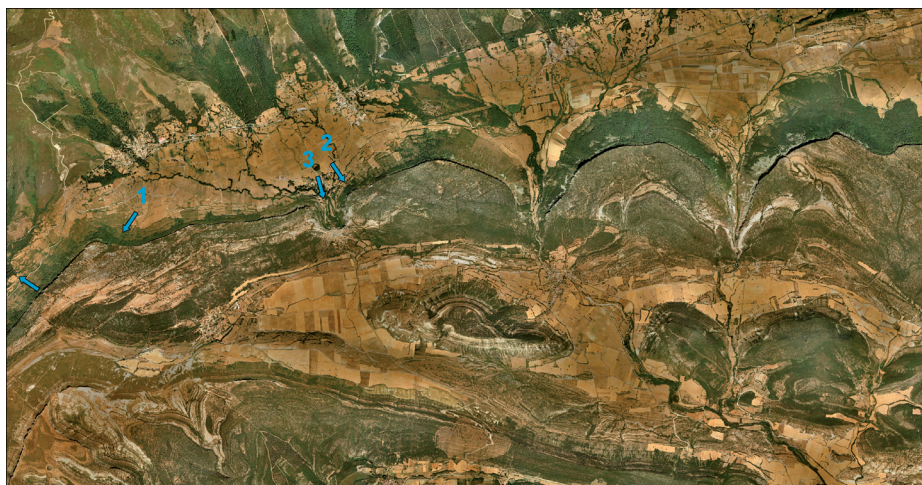


Figura 13 // Ortofoto del PNOA del IGN en la que se han marcado tres diferentes flujos de entrada de aguas al Karst de Ojo Guareña, que precedieron a la formación de su red principal, cuando el valle ciego del Guareña apenas había comenzado a formarse: 1 El Ventanón y Nejuelos; 2 Kaite; 3 San Tirso (Ortega et al., 2013a).

El perfil longitudinal proyectado N-S del Dédalo Oeste, presenta el sector más tridimensional de OG, relacionado con la zona de recarga del Guareña. Muestra como su progresivo encajamiento generó seis niveles de conductos en la red principal de OG (Fig. 15) (GEE, 1986; Ortega et al., 2013a). Los más elevados se caracterizan por presentar grandes secciones freáticas, generalmente colmatadas por sedimentos finos o potentes espeleotemas y, en algunos puntos, por importantes colapsos. El perfil muestra como OG se corresponde con un sistema multinivel vinculado con la evolución hidrológica del nivel de base local, clarificando las dudas iniciales de Eraso en cuanto a su génesis (Eraso, 1965).

Pero el mismo perfil también muestra un aspecto de enorme interés evolutivo en OG, el hecho de que las precipitaciones caídas sobre las margas santonienses ubicadas en torno al cierre periclinal del Sinclinal de La Mesa, sean drenadas por el arroyo de Villamartín y finalmente también acaben infiltrándose al endokarst por la Sima Dolencias. Para ello, han seccionado los conductos de los paleoniveles más antiguos de OG, que parcialmente se habían colmatado, provocando su reexcavación (Fig. 16), aspecto que ya fue apuntado por Eraso (1965).

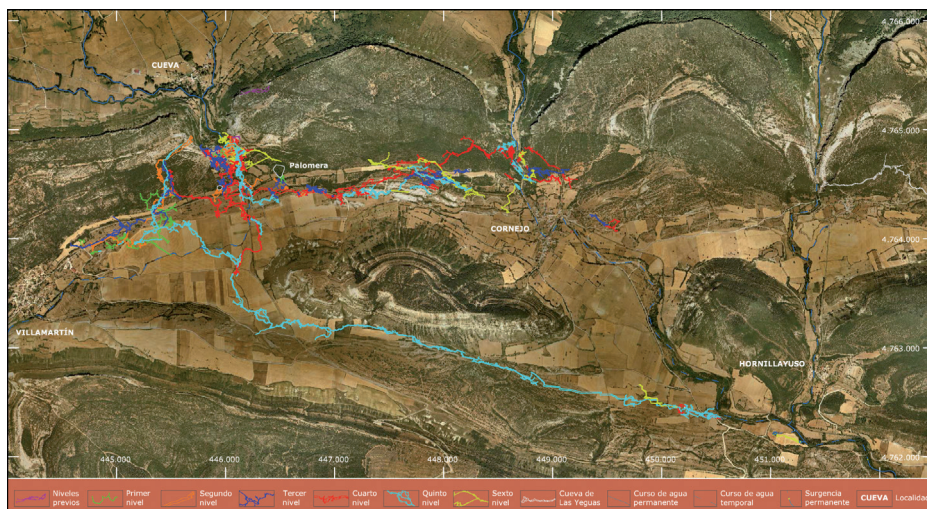
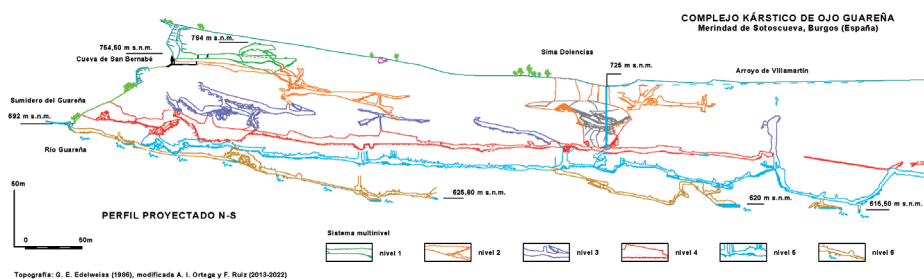


Figura 14 // Superposición del Complejo Kárstico de Ojo Guareña sobre las ortofotos del PNOA del IGN (Topografía G. E. Edelweiss, montaje Ana I. Ortega y Francisco Ruiz, en Ortega et al., 2013a).



Topografía: G. E. Edelweiss (1986), modificada A. I. Ortega y F. Ruiz (2013-2022)

Figura 15 // Perfil longitudinal proyectado N-S del Dédalo Oeste (Topografía G. E. Edelweiss 1986; modificado A. I. Ortega & F. Ruiz 2013, en Ortega et al., 2013a).

Nos encontramos ante un acuífero que se recarga principalmente a partir de la alimentación alóctona proporcionada por los ríos Guareña, Trema y de La Hoz, si bien este último no tiene relación con la red principal de galerías conocida hasta el momento, alimentando directamente el sector oriental del acuífero, próximo a la zona de descarga, en el que presumiblemente todos los conductos permanecen inundados. También es importante la recarga con las precipitaciones caídas en el macizo. Cuando



Figura 16 // El arroyo de Villamartín se precipita actualmente por la Sima Dolencias, salvando un desnivel de 54 m, directamente hasta las galerías del cuarto nivel, seccionando conductos de los niveles superiores (Fotografía Pedro Carazo, Arch. GEE).

las calizas coniacienses afloran en superficie, las aguas de lluvia o deshielo se infiltran directamente hacia el endokarst. Donde afloran las margas santonienses, se forman arroyos que discurren durante kilómetros hasta que alcanzan las calizas y pueden recargar el acuífero. A medida que el nivel freático se iba encajando, en paralelo a la red hidrográfica, las surgencias del acuífero kárstico se fueron desplazando progresivamente hacia el SE (Fig. 17) (Ortega et al., 2013a).

Los conductos del primer nivel se desarrollan aproximadamente a cotas situadas en torno a 90 y 110 m sobre el actual nivel de base, que corresponderían al rango comprendido entre la T7 (+111/115), T8 (+98/105) y T9 (+89/95), a las que se atribuyen cronologías de 1,02, 0,99 y 0,95 Ma (Benito-Calvo et al., 2021). Todos los conductos de este nivel se localizan en los sectores más occidentales y corresponden a las galerías más elevadas de la Cueva de San Bernabé (Dédalo Oeste) generadas por el Guareña, al igual que otras del Sector Dulla (Carta, Réplica, Patatas Fritas). Pero además, en el Sector Rizuelos, existen otras galerías que parecen claramente relacionadas con antiguas infiltraciones de aguas en el páramo de Villamartín, probablemente vinculadas con Cueva Racino y algún paleosumidero del arroyo de Villamartín.

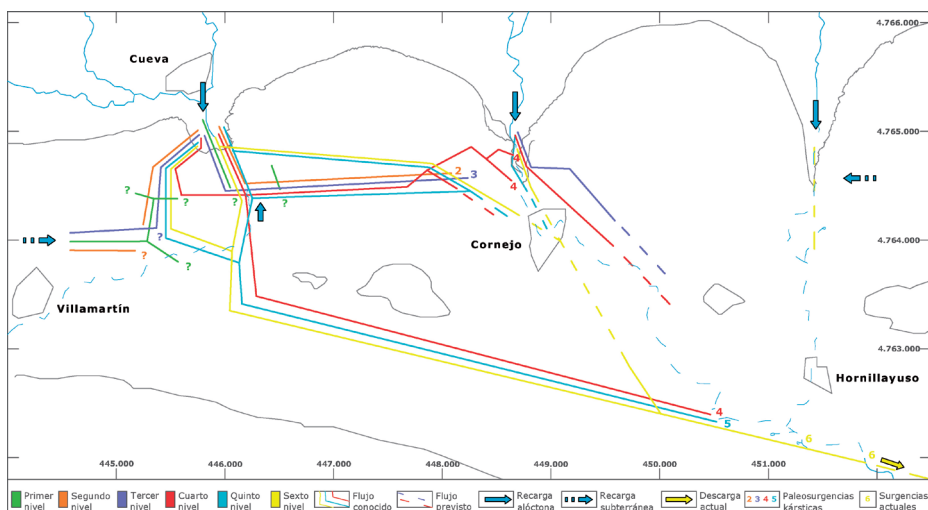


Figura 17 // Esquema de la alimentación del acuífero y de las circulaciones preferenciales en cada nivel geomorfológico de OG, así como su relación con las paleosurgencias o con la actual zona de descarga, que se ha ido desplazando progresivamente hacia el SE (Ana I. Ortega y Miguel Á. Martín en Ortega et al., 2013a).

En el Sector Dulla, una génesis similar tal vez podría indicarse para el conducto de la Galería del Beso, que puede remontarse hasta el extremo NO de OG, en un punto en el que en su día (1977) detectamos una intensa corriente de aire (Martín et al., 1986: 162) y en el que más recientemente (02/09/2018) pudimos recoger un hueso fosilizado, con gravas finas adheridas al mismo, que está pendiente de estudio pero indicaría una conexión con la superficie. No se han encontrado surgencias relacionadas con el primer nivel, por lo que deducimos que las aguas alimentarían directamente al acuífero kárstico (Ortega et al., 2013).

Los conductos del segundo nivel se desarrollan en cotas situadas entre 75 y 90 m sobre el nivel freático, que corresponden al rango comprendido entre la T9 (+89/95), T10 (+80/85) y T11 (+72/76), cuyas cronologías se estiman en torno a 0,95, 0,91 y 0,86 Ma (Benito-Calvo et al., 2021). El origen de los conductos de este nivel sería similar al descrito previamente: el Guareña a través de su encajamiento en la Cueva de San Bernabé y en el Sector Dulla



Figura 18 // La Sala Berta, en el Sector Dulla, canalizó buena parte de las aguas del río Guareña en las primeras fases de formación de la cavidad (Fotografía Miguel Á. Martín, Arch. GEE).



Figura 19 // La Galería de la Escalada da acceso a los conductos occidentales de Rizuelos (Fotografía Miguel Á. Martín, Arch. GEE).

(Fig. 18) y las aguas del arroyo de Villamartín que continuaron generando conductos a cotas más bajas (Fig. 19). Tampoco se conocen paleosurgencias que se correlacionen con este nivel, con excepción de la Sima de los Huesos (SH), con marcadas huellas de corriente ascendentes que alcanzan las cotas de sus bóvedas, por lo que pudiera haber actuado como surgencia de las aguas poco antes de que alcanzaran el Cañón del Trema (Ortega et al., 2013).

Los conductos del tercer nivel evolucionan en cotas situadas, entre 60 y 75 m, por encima del nivel de base, que se correlacionarían con las terrazas T11 (+72/76) y T12 (+59/65), con cronologías atribuidas a 0,86 y 0,81 Ma (Benito-Calvo et al., 2021). Estas galerías ya tienen una mayor continuidad (Fig. 20) y encuentran una clara correlación, dentro de la Axial Principal, en los sectores Central y Este-Huesos. Como hemos visto, Covaneria sería la paleosurgencia (Fig. 21) de esta etapa antigua, como intuía Eraso (1965). Se localiza en el mismo eje que la SH, pero a cota algo más baja y próxima al cañón del río Trema. En su margen izquierda, el



Figura 20 // La Galería de las Huellas II, del Dédalo Oeste, es uno de los conductos más representativos del tercer nivel (Fotografía Miguel Á. Martín).



Figura 21 // Covaneria, aislada de la red principal por colmatación debida a sedimentos finos, fue identificada por Eraso (1965) como paleosurgencia, por sus huellas de corriente ascendentes (Fotografía Miguel Á. Martín).

río Trema generó conductos relacionados con el tercer nivel en Cueva La Mina y la Sima Jaime (Ortega et al., 2013a).

El cuarto nivel es el de mayor desarrollo de Ojo Guareña y sus conductos evolucionan en cotas superiores, entre 35 y 55 m, al nivel freático, que se corresponderían con las terrazas T13 (+48/56), T14 (+44/46), T15 (+37/43) y T16 (+33/36), con cronologías respectivas de 0,74, 0,68, 0,65 y 0,60 Ma (Benito-Calvo et al., 2021). Los conductos del cuarto nivel de OG generalmente se caracterizan por sus amplias dimensiones. En muchos puntos hay evidencias de que sus secciones llegaron a estar prácticamente colmatadas con gravas de cantos rodados de arenisca y clastos angulosos de caliza, con importantes procesos de reexcavación. Las grandes avenidas, en la actualidad, siguen provocando importantes subidas del nivel freático que llegan a alcanzar el cuarto nivel, facilitado por la pérdida de las aguas del arroyo de Villamartín por la Sima Dolencias. El principal conducto de la Axial Principal discurre en sentido O-E (Figs. 22 y 23) hasta que se bifurca poco antes del Cañón del Trema. La Galería



Figura 22 // La Galería Principal evoluciona en sentido O-E. Este tramo, afectado por procesos crioclásticos, se conoce como Sala Edelweiss (Fotografía Miguel Á. Martín, Arch. GEE).

Speos tiene una menor sección, pero mantiene las cotas de las bóvedas, por lo que parece marcar un conducto primigenio que generó las paleosurgencias de Cueva Cornejo y Cueva del Prado Vargas. Por su parte, la continuación del eje principal del cuarto nivel, formado por las galerías Manuel Iradier y Esperanza, con una sección mucho mayor que Speos, marca una dirección SE y desciende de forma escalonada hasta alcanzar el sexto nivel y sifonarse (Ortega et al., 2013a).

Al final de esta etapa genética se inicia la captura de buena parte del caudal del Guareña hacia el flanco sur del sinclinal, a través de la Sima de los Italianos, generando los sectores conocidos como Segunda Axial y Resurgencia. A partir de la Sima del Divino Aurelio, justo antes de superar el eje del sinclinal, el conducto continuó evolucionando en cotas inferiores, ya propias del quinto nivel. Tan solo en las proximidades de la resurgencia de La Torcona se vuelven a encontrar sectores elevados equiparables



Figura 23 // Con el topónimo de Los Lagos se designa al tramo del eje principal con el que da comienzo el Sector Este-Huesos (Fotografía Miguel Á. Martín, Arch. GEE).

con el cuarto nivel, dejando claro que la boca superior de La Torcona, hoy inactiva, drenó el flujo meridional en los últimos momentos de esta fase, confirmando el desplazamiento hacia el SE de la zona de descarga del acuífero. Los flujos menores que hoy en día continúan circulando por la Axial Principal, o los que se sumen por el río Trema, alimentan directamente el acuífero y resurgen en la citada zona de descarga, aguas abajo del Cañón del Trema (Fig. 17) (Ortega et al., 2013a).

Los conductos del quinto nivel evolucionan entre 15 y 30 m por encima del nivel freático, por lo que altitudinalmente se correlacionan con las terrazas T17 (+27/32), T18 (+20/25), T19 (+17/22) y T20 (+11/16), datadas en 0,55, 0,43, 0,40 y 0,27 Ma (Benito-Calvo et al., 2021). Están distribuidos por casi todos los sectores de OG y son activos en época de grandes avenidas. Los sectores Dulla y Dédalo Oeste canalizaron la mayor parte de las aguas del Guareña hacia la Segunda Axial y Sector Resurgencia, formados en la etapa anterior (Fig. 24). La boca principal de La Torcona fue la surgencia permanente de esta fase, manteniendo actualmente su actividad en aguas altas, después de intensas precipitaciones o deshielos.

No obstante, parte del flujo del Guareña seguía discurriendo por la Axial Principal a través de dos conductos. Una parte del caudal fluía desde la Sala Guipúzcoa, hacia el E, por la Galería de las Charcas, mientras que otra parte, que inicialmente discurría en dirección S por la Galería de las Ovejas, también giraba hacia el E por la Galería de la Fotokina. Ambos cursos de agua terminarían mezclándose en el acuífero con las del río Trema, fluyendo en régimen laminar, hacia el S, hasta la resurgencia de La Torcona (Ortega et al., 2013).

El sexto nivel es por el que actualmente circulan de forma permanente las aguas de los ríos Guareña y Trema y comenzaría a formarse en los últimos 0,2 Ma, atendiendo a las correlaciones de los anteriores paleoniveles con las terrazas del Ebro y sus cronologías (Benito-Calvo et al., 2021). En el Dédalo Oeste puede seguirse el curso del Guareña (Fig. 25), durante unos cientos de metros, hasta sus sifones, mientras que en pleno estiaje otro corto tramo puede recorrerse en el fondo de la Sima de los Italianos,

tras descender un pequeño salto. El resto de su recorrido hasta la zona de descarga lo hace por conductos permanentemente inundados. A su vez, el río Trema puede seguirse en un corto tramo entre sifones al que se accede a partir de la entrada meridional de Cueva La Mina, o bien por uno de los Sumideros del Trema. Las aguas de ambos cursos resurgen de forma temporal en El Torcón y de forma permanente en el cauce del río, en el punto surgente del km. 8, siendo represadas por un azud destinado a un molino. No obstante, el buceador Martín Burgui consiguió descender -87 m por debajo del nivel freático en el Sifón Profundo de la Sima de Villallana, lo que nos hace vislumbrar que la red de conductos sifonados del acuífero kárstico de Ojo Guareña será mucho mayor de lo que todos imaginábamos (Rioseras & Burgui, 2010; Ortega et al., 2013a).

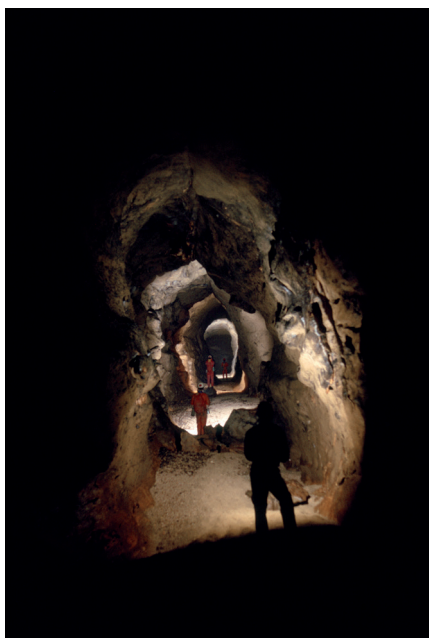


Figura 24 // La Galería del Aburrimiento, de la Segunda Axial, canalizó las aguas del quinto nivel hacia la resurgencia de La Torcona (Fotografía Miguel Á. Martín, Arch. GEE).

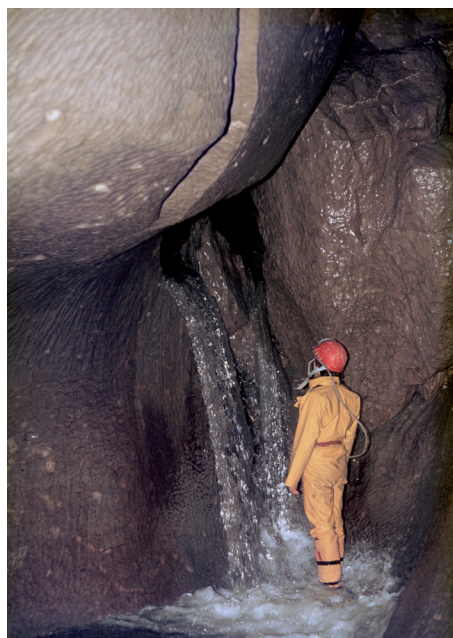


Figura 25 // El río Guareña discurre a favor del buzamiento, entre cascadas, marmitas y pequeños rápidos, hasta que se sifona al alcanzar el nivel freático (Fotografía Miguel Á. Martín, Arch. GEE).

3.5. Génesis y cronología de la Sima Dolencias y de Cueva Palomera

Anteriormente ya nos hemos referido a la presencia en la Sima Rizuelos, en el extremo occidental de OG, de una red de conductos predominantemente horizontales que pertenecen a los tres niveles más elevados del karst. Su peculiaridad es que marcan una dirección de drenaje en sentido O-E que nada tiene que ver con los flujos subterráneos del Guareña en sentido N-S. En su momento ya se indicaba que canalizaron las aguas superficiales del páramo de Villamartín, pareciéndonos evidente que estaban relacionados tanto con Cueva Racino como con algún antiguo paleosumidero del arroyo de Villamartín, que se localizaría al SO de la localidad y canalizara hacia el acuífero las aguas que discurrían sobre las margas santonienses. El colapso de la bóveda de la Sala de Villamartín, en el primer nivel de Rizuelos e identificado en el exterior en una zona deprimida en medio de unas fincas agrícolas, también pudo ser un antiguo paleosumidero hoy totalmente colmatado (Ortega & Martín, 2011; Ortega et al., 2013).

Es evidente el retroceso hacia el S, debido a la erosión, del paquete de margas santonienses que reposa sobre las calizas coniacienses de OG. En el contacto entre ambos se ha formado una incipiente depresión ortoclinal en la que se alinean algunas de las principales bocas de entrada del Complejo: Cubía, Sima Dolencias, Cueva Palomera, Sima de los Huesos y Covaneria (Martín, 1986a; Ortega et al., 2013a). Este paquete margoso, por lo general impermeable, sigue recubriendo hoy en día todo el fondo de la depresión sinclinal ubicada inmediatamente al S del Ojo del Guareña.

Inicialmente, el arroyo de Villamartín continuaba discurriendo superficialmente, en sentido E, hasta aportar sus aguas directamente al río Trema. El topónimo «La Cerrada» nos está indicando el comienzo de la incisión de un barranco, en las margas, que llega a alcanzar una profundidad de más de 20 m en «Botizán» y, tras atravesar el término de «La Portilla», acaba confluyendo con el Trema, en el mismo pueblo de Cornejo. Incluso existe un segundo barranco que discurre en paralelo, unos 150 m

secuencia estratigráfica holocena y los del final de la Galería del Sueño, junto a fósiles de úrsidos, sellados por una costra estalagmítica. Las analíticas posteriores realizadas en el CENIEH (Toshiyuki Fuijoka com. pers.) confirmaron que en todos los casos eran rellenos margosos y que ninguna de las muestras poseía partículas de cuarzo que posibilitaran su datación mediante isótopos cosmogénicos. Esta ausencia de cuarzo descarta aportes del Guareña, en cuya cabecera, en los Montes del Somo, se localizan sedimentos silíceos y gravas de arenisca, por lo que su procedencia apunta a un aporte de un primigenio arroyo de Villamartín.

Una comprobación adicional de las terrazas que colmatan la posible continuidad de la Galería del Sueño y de la Galería del Chipichondo, laterales de la Rampa de Palomera, ha permitido confirmar que en su matriz solo existen pequeños cantos rodados de calizas margosas, similares a los de la cabecera del barranco de «La Cerrada». Tampoco se observan sedimentos arenosos ni cantos silíceos en las secuencias de la Sala Keimada, cuyo origen se encuentra colmatado por la estratigrafía de Cueva Palomera.

En el exterior de Cueva Palomera, los únicos cantos rodados de arenisca que hemos observado son todos de gran tamaño y son aportes antrópicos dispuestos recientemente para señalar los senderos que facilitan la aproximación de los turistas a la cavidad. Ocasionalmente, en relación con la zona de hábitat de la cavidad, tanto superficialmente como en las diferentes catas arqueológicas, se han localizado restos de molinos de mano de arenisca de época prehistórica.

Un encajamiento posterior del arroyo de Villamartín motivaría que también Cubía y la boca principal de la Sima Dolencias comenzaran a actuar como sumideros. En el caso de Cubía lo haría de forma similar a Cueva Palomera, a través de un conducto descendente que progresivamente gana profundidad, aunque sus galerías apenas alcanzan las cotas del segundo nivel de OG. Actualmente, en época de grandes precipitaciones, es posible observar cómo se sumen las aguas de escorrentía de la depresión margosa en donde se abre Cubía, provocando la colmatación de su entrada. En el caso de Dolencias, una falla con

desplazamiento horizontal y dirección NO-SE facilitó la captura definitiva del arroyo de Villamartín hacia los niveles inferiores de la cavidad previamente formados.

En la última fase evolutiva, el punto concreto por el que se sumía el arroyo de Villamartín se fue desplazando, a medida que descendía de cota, hacia el SE, a favor de la citada falla y del buzamiento de los estratos, salvando un espectacular salto de 54 m hasta las galerías del cuarto nivel (Fig. 27). En los momentos de grandes precipitaciones o deshielos, el arroyo de Villamartín

se desborda inundando las fincas circundantes, recordándonos los grandes caudales que debió evacuar de forma más habitual en tiempos pasados.

Aún no se ha realizado ningún estudio que permita asignar cronologías a los diferentes sedimentos depositados por el arroyo de Villamartín en sus diferentes sumideros, pero lo que es indudable es que la brusca captura de su cauce por las cavidades citadas, tuvo que provocar en el interior de Ojo Guareña importantes reexcavaciones de las terrazas sedimentarias del río Guareña. Tras las primeras infiltraciones, los diferentes colapsos de las bóvedas de Dolencias y de Palomera, modificaron por completo la original fisonomía de la cavidad, que apenas podemos llegar a imaginar. En estas



Figura 27 // La cascada que forma el arroyo de Villamartín en la Sima Dolencias, vista desde el cuarto nivel (Fotografía Miguel Á. Martín).

circunstancias resulta complejo establecer paralelos, al menos en el entorno de la Sima Dolencias y Cueva Palomera, en la correlación entre los diversos niveles de los conductos. Si bien las Galerías Altas de Palomera tradicionalmente se han incluido en el primer nivel, la Galería del Sueño en el segundo nivel y la Galería del Chipichondo y Sala Keimada en el tercer nivel (Martín, 1986b; GEE, 1986: Atlas Cartográfico; Ortega et al., 2013a), eso no quiere decir que se correspondan evolutivamente con los niveles equivalentes generados por el río Guareña a partir del Circo de San Bernabé. Por otra parte, los conductos que se abren en el nivel superior de la Sima Dolencias, que anteriormente hemos asignado al segundo nivel (Martín, 1986a; GEE, 1986: Atlas Cartográfico; Ortega et al., 2013a), también podrían ser posteriores pues las evidencias de colmatación de la Galería Sepulcral, e incluso de la Galería de los Grabados, recuerdan mucho a los sedimentos que colmatan las ya descritas galerías del entorno de Palomera.

4 SÍNTESIS DEL ACTUAL CONOCIMIENTO GEOLÓGICO Y EVOLUTIVO DE ATAPUERCA

4.1. Geología y Geomorfología

La Sierra de Atapuerca (SA) está formada por calizas y dolomías depositadas durante el Cretácico Superior en el fondo marino. Empezaron a emerger con el plegamiento alpino que originó las principales cordilleras europeas, conformando desde el Oligoceno, hace unos 30 millones de años, un relieve anticlinal aislado de dirección SE-NO que actúa de puente entre el Sistema Ibérico y la Cordillera Cantábrica. Durante millones de años permaneció emergida como una isla calcárea rodeada por un mar interior en el que se depositaban otros materiales sedimentarios como margas, yesos, o las calizas de los páramos, mientras la erosión arrasaba su cumbre durante el Mioceno. Cuando el primitivo río Duero logró excavar un cañón, atravesando los granitos de Las Arribes, comenzó el drenaje hacia el Atlántico de ese antiguo mar interior. Su progresivo encajamiento, así como el de sus afluentes, provocó el desmoronamiento de aquellos sedimentos terciarios. Se estima que el encajamiento de la

cabecera del río Arlanzón en el entorno de la SA comenzó hace poco más de 2 o 3 millones de años, cuando los ríos Arlanzón y Vena comenzaron a fluir, creando las primeras terrazas fluviales (Pérez-González et al., 2001; Benito-Calvo & Pérez-González, 2007, 2015; Benito-Calvo et al., 2017, 2018).

4.2. Karstificación y génesis hipogénica

Las aguas de lluvia, cargadas de anhídrido carbónico, iniciaron la karstificación de la Sierra de Atapuerca, disolviendo sus calizas y dando lugar a las primeras formas exokársticas: lapiazes y dolinas. Tras su infiltración hacia el subsuelo a través de fisuras, comenzaría la karstificación habitual de origen epigénico, creándose las primeras cavidades en los sectores más elevados de la SA, por encima del nivel freático que marcaría el circundante mar mioceno. No obstante, la escasa superficie emergida y el reducido espesor sobre el nivel freático apenas posibilitarían la formación de conductos de importancia. Pero las

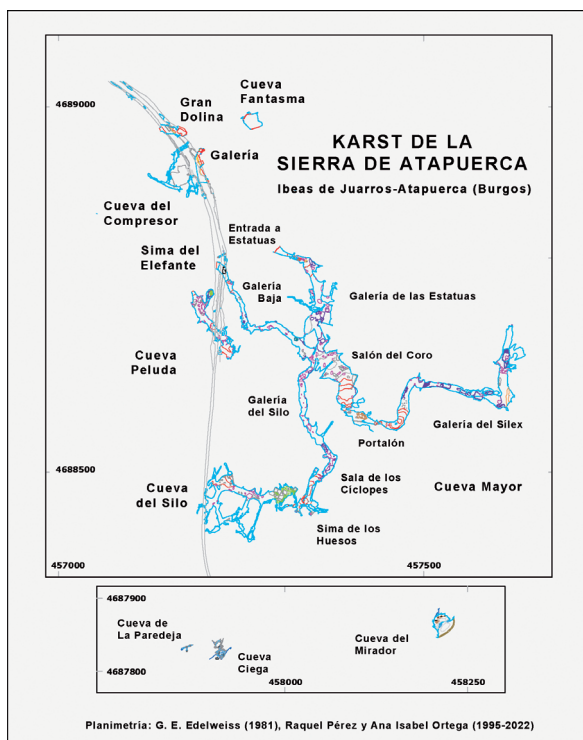


Figura 28 // Topografía en planta de las principales cavidades del karst de la Sierra de Atapuerca (Topografía G. E. Edelweiss, 1981. Modificado Ana I. Ortega y Raquel Pérez, 1995-2022).

grandes dimensiones de los conductos de este modesto macizo no encajan con un origen epigénico.

La presencia de grandes chimeneas, con claras huellas de corriente ascendentes, apunta a una génesis hipogénica en la que las aguas subirían desde un acuífero semiconfinado hasta alcanzar el nivel freático marcado por el río Arlanzón. Una vez alcanzado el equilibrio piezométrico, las aguas discurrirían a favor del gradiente hidráulico hasta alcanzar los diferentes puntos surgentes que originaron las fuentes del río Pico. Este proceso continuó en paralelo al encajamiento del río Arlanzón, generando un sistema multinivel con tres conductos escalonados que evolucionaron, en sentido NNO, paralelos a la ladera meridional de la SA. El Sistema Cueva Mayor - Cueva del Silo, así como Cueva Peluda y las restantes cavidades seccionadas por las obras de la Trinchera del Ferrocarril o por las sucesivas canteras se ajustan al modelo descrito. Algo más elevadas y en el extremo meridional de la SA se localizan las cuevas de La Paredeja, Ciega y Mirador, cuyas bóvedas también apuntan a morfologías hipogénicas y por tanto podrían corresponder a otro nivel más antiguo (Figs. 28 y 29) (Ortega, 2009; Ortega et al., 2005, 2011, 2012b, 2013b, 2014, 2018; Ortega & Martín, 2021).

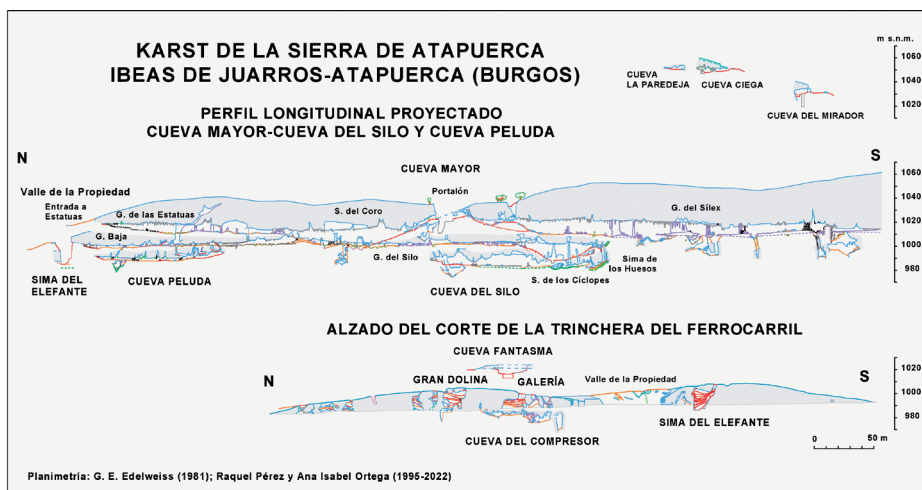


Figura 29 // Perfil longitudinal del Sistema Cueva Mayor – Cueva del Silo y otras cavidades de la Sierra de Atapuerca (Topografía Ana I. Ortega, Raquel Pérez y G. E. Edelweiss (Ortega & Martín, 2021)).

En las inmediaciones de la SA, concretamente en el pueblo de Arlanzón, existen aguas hidrotermales cargadas en gas carbónico, muy próximas a la actual resurgencia del río Arlanzón, que previamente se infiltra en Las Tragaderas, en término de Villasur de Herreros, en el contacto litológico del Paleozoico con las calizas cretácicas. Este hecho podría haber comenzado a producirse hace algo más de dos millones de años, con el nivel freático mucho más elevado, en la fase inicial del encajamiento de la actual red hidrográfica. Estas aguas del Arlanzón, mezcladas con las de origen hidrotermal, serían mucho más corrosivas por la presencia del gas carbónico. A favor de la tectónica, ascenderían por diferentes chimeneas, dando lugar a un karst hipogénico, hasta alcanzar el nivel freático. Una vez recuperado el equilibrio piezométrico, las aguas desarrollaron conductos horizontales que generaron la zona surgente de la cabecera del río Pico, caracterizada por la presencia de una serie escalonada de manantiales relacionados con los tres paleoniveles de



Figura 30 // El gran conducto de la Galería del Sílex constituye el inicio del primer nivel del karst de la Sierra de Atapuerca (Fotografía Miguel Á. Martín).

conductos conocidos (Ortega, 2009, Ortega et al., 2011, 2012b, 2013b, 2014, 2018).

El nivel superior se origina en unas grandes chimeneas ascendentes que dieron origen al conducto de la Galería del Sílex (Fig. 30), que continuó serpenteando hasta el Portalón, adaptándose finalmente a la dirección NNO de la ladera meridional de la SA, tramo conocido como el Salón del Coro y la Galería de las Estatuas (Fig. 31). El conducto continuaría originalmente hasta Cueva Fantasma, donde se encontraría la primitiva paleosurgencia del primer nivel. No obstante, la incisión del Valle de la Propiedad dejaría aislada a Cueva Fantasma en su margen septentrional, mientras en la meridional abriría la boca surgente de la Cueva de las Estatuas, que provocaría un importante encajamiento en el perfil del tramo final del citado valle, actualmente relleno de sedimentos, como han puesto en evidencia los perfiles geofísicos realizados mediante ERT (Ortega, 2009; Ortega et al., 2010, 2012a, 2012b; Bermejo, 2021).



Figura 31 // La Galería de las Estatuas constituye el final del nivel superior, antes de que el conducto fuera seccionado por la incisión del Valle de la Propiedad (Fotografía Miguel Á. Martín).

Posteriores reactivaciones dejaron colgadas grandes costras estalagmíticas horizontales que sellaban la sedimentación original, dando lugar a falsos pisos de concreción por los que se transita entre 10 y 20 m sobre el fondo de algunas simas.

El segundo nivel se inicia en su extremo meridional en dos grandes chimeneas ascendentes: la Sima de los Huesos y el Paso de los Cíclopes, que alcanzan los techos del conducto, momento en que las aguas comenzaron a discurrir horizontalmente hacia el NNO, a través de la Sala de los Cíclopes (Fig. 32), la Galería del Silo y la Galería Baja. Finalmente resurgirían al Valle de la Propiedad y Valhondo por la paleosurgencia de la Sima del Elefante (TE), actualmente colmatada y seccionada por la Trinchera del Ferrocarril. El nivel intermedio también estuvo colmatado de sedimentos, prácticamente hasta el techo, y sellado por un potente espeleotema que fue parcialmente desmantelado por



Figura 32 // Las chimeneas ascendentes de la Sima de los Huesos y del Paso de los Cíclopes alcanzan el techo de la Sala de los Cíclopes, generando el inicio del segundo nivel del karst de Atapuerca (Fotografía Miguel Á. Martín, Arch. GEE).

reactivaciones posteriores. En Valhondo se formó un área lagunar que, en momentos puntuales de grandes precipitaciones, provocó que TE funcionara temporalmente de sumidero. En el tramo norte de la Trinchera se localizan varias cavidades colmatadas de sedimentos que también pertenecerían al segundo nivel, entre ellas los conocidos rellenos de Galería (TG) y Gran Dolina (TD). Esta última fue identificada como otra antigua paleosurgencia por Adolfo Eraso (Eraso et al., 1998a, 2001c).

El tercer nivel se inicia en el enrejado laberíntico de la Cueva del Silo, caracterizado por la existencia de multitud de chimeneas ascendentes, ya puestas evidencias por Eraso, que identificó a esta cavidad como la principal resurgencia del karst (Eraso et al., 1998a, 2001c). No obstante, tan solo fue una de las diferentes surgencias activas mientras se desarrollaba el tercer nivel, con una marcada génesis hipogénica (Fig. 33). En un momento posterior a su formación, el río Arlanzón lograría sumirse directamente en la SA, depositando una terraza de cantos rodados, arenas y limos en los puntos bajos de esta cavidad, en cotas de 980-985 m s.n.m. (Ortega, 2009, Ortega et al., 2013b, 2018), lo que sin duda debió ser una de las causas de las grandes reexcavaciones observadas en los niveles más elevados.



Figura 33 // Las bóvedas de la Cueva del Silo se caracterizan por la presencia de multitud de chimeneas ascendentes que nos hablan de la evidente génesis hipogénica de la cavidad (Fotografía Miguel Á. Martín).

Cueva Peluda también pertenece al nivel inferior del karst, aunque actualmente se encuentra desconectada del Sistema Cueva Mayor – Cueva del Silo. Evolucionó en sentido NNO, en paralelo a los niveles ya descritos, hasta que las aguas emergerían al Valle de la Propiedad por otra boca surgente, en la actualidad colmatada. En un pequeño subnivel inferior se puede observar la terraza fluvial (Fig. 34) descrita en la Cueva del Silo y en la base del sondeo mecánico realizado en TE (Ortega, 2009; Ortega et al., 2018; Rosas et al., 2006).

La Cueva del Compresor, que se abre en el extremo norte de la Trinchera del Ferrocarril, frente al yacimiento de Galería, se desarrolla en cotas correspondientes al tercer nivel del karst y su génesis hipogénica vuelve a estar marcada por grandes chimeneas con claras huellas de corriente ascendentes. En ella no se encuentran vestigios de la citada terraza del Arlanzón, posiblemente debido al encajamiento del Valle de la Propiedad, un profundo cañón por donde aflorarían los sedimentos de esta terraza, en cotas próximas a los 979-985 m, algo más al N de



Figura 33 // En el subnivel inferior de Cueva Peluda se puede observar la misma terraza sedimentaria del río Arlanzón que se depositó en la Cueva del Silo (Fotografía M. Á. Martín).

Cueva Peluda y TE. El fondo del valle actualmente presenta una colmatación superior a 15 m (Ortega et al., 2010; Bermejo, 2021).

5. AGRADECIMIENTOS

A la Junta de Castilla y León por autorizar los diferentes proyectos de exploración e investigación en Ojo Guareña y Atapuerca. A la Diputación Provincial de Burgos por patrocinar los trabajos del G. E. Edelweiss en ambos sistemas kársticos, así como a los diferentes miembros del GEE que participaron activamente en ellos. A la Fundación Atapuerca por su patrocinio de las investigaciones de AIOM y al Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (CENIEH) por apoyar e implicarse en los trabajos de Geomorfología y Geocronología que, aparte de en Atapuerca, también se están realizando en estos últimos años en Ojo Guareña. A la Sociedad Española de Espeleología y Ciencias del Karst (SEDECK) por invitarnos a participar en este libro de homenaje al Dr. Adolfo Eraso Romero. Él fue uno de los promotores iniciales de la SEDECK y nos convenció para integrarnos en la misma. Para nosotros fue un maestro con el que aprendimos a observar el karst y a hacernos preguntas sobre su origen y evolución. Esperamos haber contribuido a la aclaración de algunas de ellas.

6. REFERENCIAS

- Armengou, J. M. (1959). Exploraciones Subterráneas, Ed. Temple, 308 pp.
- Armengou, J. M. (1964). Operación Ojo Guareña, en M. Lleget (ed.), Técnica y Aventura Subterránea. Ed. Hispano Europea, 188-227.
- Baquero, J. C., Eraso, A. (1992). Mundo Subterráneo. Complejo de Ojo Guareña. Sotoscueva (Burgos), Tecno Ambiente, 19, separata 8 pp.
- Baquero, J. C.; Eraso, A. (1994). Complejo de Ojo Guareña. Sotoscueva (Burgos), en R. Fernández-Rubio (coord.), Mundo Subterráneo, 137-144.
- Benito-Calvo, A. Pérez-González, A. (2007). Erosion surfaces and Neogene landscape evolution in the NE Duero Basin (north-central Spain). Geomorphology, 88, 226-241.

Benito-Calvo, A., Pérez-González, A. (2015). Geomorphology of the Sierra de Atapuerca and the Middle Arlanzón Valley (Burgos, Spain). *Journal of Maps*, 11, 535-544.

Benito-Calvo, A., Ortega, A. I., Pérez-González, A., Campaña, I., Bermúdez de Castro, J. M., Carbonell, E. (2017). Palaeogeographical reconstruction of the Sierra de Atapuerca Pleistocene sites (Burgos, Spain), *Quaternary International*, 433, 379-392.

Benito-Calvo, A., Ortega, A. I., Navazo, M., Moreno, D., Pérez-González, A., Parés, J. M., Bermúdez de Castro, J. M., Carbonell, E. (2018). Evolución geodinámica pleistocena del valle del río Arlanzón: implicaciones en la formación del sistema endokárstico y los yacimientos al aire libre de la Sierra de Atapuerca (Burgos, España), *Boletín Geológico y Minero*, 129 (1), 59-82.

Benito-Calvo, A., Moreno, D., Fujioka, T., López, G. I., Martín, F., Martínez, A., Hernando, I., Karampaglidis, T., Bermúdez de Castro, J. M., Gutiérrez, F. (2021). Towards the steady state? A long-term river incision deceleration pattern during pleistocene entrenchment (Upper Ebro River, Northern Spain), *Global and Planetary Change*, 103813, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103813>.

Bermejo, L. (2021). Reconocimiento de morfologías endokársticas y yacimientos en los karst de la Sierra de Atapuerca y Ojo Guareña (Burgos) mediante técnicas de prospección geofísica. Tesis doctoral (inérita). Universidad de Burgos

Bermejo, L., Ortega, A. I., Guérin, R., Benito-Calvo, A., Parés, J. M., Martín, M. Á., Aracil, E., Maruri, U., Porres, J. Á. (2016). Electrical resistivity imaging survey around the caves of the Ojo Guareña Karst complex (Merindad de Sotoscueva, Burgos, Spain), in H. Kamermans, W. de Neef, C. Piccoli, A. G. Posluschny and R. Scopigno (eds.), *The Three Dimensions of Archaeology. Proceedings of the XVII UISPP World Congress (1-7 September 2014, Burgos, Spain)*, vol. 7, 141-150.

Carbonell, E., Bermúdez de Castro, J. M., Arsuaga, J. L., Eraso, A. (1997). *Mundo Subterráneo. Los homínidos de la Sierra de Atapuerca (Burgos)*, *Tecno Ambiente*, 73, separata 8 pp.

Ciry, R. (1939). *Étude Géologique d'une partie des provinces de Burgos, Palencia, Léon et Santander*, Univ. Paris, 519 pp.

Eraso, A. (1963). Ideas sobre la climática subterránea, *Estudios del Grupo Espeleológico Alavés*, I (1962-1963), Vitoria, 21-41.

Eraso, A. (1965). Introducción al estudio del Karst de Ojo Guareña, *Geo y Bio Karst*, 5-6, 1-31.

Eraso, A. (1966). Comportamiento físico - químico del Complejo Palomera-Dolencias (Ojo Guareña, Burgos), *Geo y Bio Karst*, 9, 28-32.

Eraso, A. (1980). Datos para el proyecto de investigación hidrogeológica del Complejo Kárstico de Ojo Guareña. Merindad de Sotoscueva (Burgos). Inédito.

Eraso, A. (1983). Consideraciones sobre el problema de la génesis y evolución del karst, Reunión Monográfica sobre el Karst - Larra 82, 367-382.

Eraso, A. (1986a). El Karst del complejo de cavidades de Ojo Guareña (Burgos), en G. E. Edelweiss (ed.), Monografía sobre Ojo Guareña, Kaite, 4-5, 39-49.

Eraso, A. (1986b). Método de predicción de las direcciones principales de drenaje en el Karst. Kobie, Serie Ciencias Naturales, 15, 15-122 más anexo informático.

Eraso, A. (1986c). Aplicación del método de predicción de las direcciones de drenaje al Karst de Larra (Navarra-Francia) y al Karst de Ojo Guareña (Burgos), Jornadas sobre el Karst en Euskadi, 2, 229-254.

Eraso, A. (1993). Informe Geológico sobre la posible viabilidad turística del Complejo Kárstico de Ojo Guareña (Merindad de Sotoscueva, Burgos), en A. I. Ortega (1993), Informe de viabilidad y alternativas de acondicionamiento turístico del Complejo Kárstico de Ojo Guareña (Merindad de Sotoscueva, Burgos). Informe inédito a la JCyL, 50 pp.

Eraso, A., Domínguez, M. C., Pérez, A., Martín, M. Á., Ortega, A. I. (1998a). Estimación de las paleovelocidades y sentidos de circulación del agua en el karst donde se emplaza el yacimiento arqueológico de la Sierra de Atapuerca (Burgos), Geogaceta, 23, 39-42.

Eraso, A., Domínguez, M. C., Ortega, A. I., Martín, M. Á., Gavilán, C. J., Paredes, C., Gallego, N., Giralt, S. (1998b). Ley de distribución de planos de debilidad en la Sierra de Atapuerca (Burgos): aplicación al drenaje del karst, Geogaceta, 23, 43-46.

Eraso, A., Baquero, J. C., Opolka-Gadek, J., Gadek, B. (2001a). Investigación hidroquímica en el acuífero de Ojo Guareña. Repercusiones hidrogeológicas, SEDECK, 2, 21-28.

Eraso, A., Domínguez, M. C., Ortega, A. I., Martín, M. Á., Gavilán, C. J., Paredes, C., Gallego, N., Giralt, S. (2001b). Ley de distribución de planos de debilidad en la Sierra de Atapuerca (Burgos): aplicación al drenaje del karst, SEDECK, 2, 52-60.

Eraso, A., Domínguez, M. C., Ortega, A. I., Martín, M. Á., Pérez, A. (2001c). Estimación de las paleovelocidades y sentidos de circulación del agua en el karst donde se emplaza el yacimiento arqueológico de la Sierra de Atapuerca (Burgos), SEDECK, 2, 61-68.

Eraso, A., Domínguez, M. C., Ruiz, F. (2001d). Predicción de las direcciones preferenciales de drenaje subterráneo en el Karst de Ojo Guareña. VI Jornadas Científicas de la Sociedad Española de Espeleología y Ciencias del Karst. Espinosa de los Monteros (Burgos).

Grupo Espeleológico Edelweiss (1986). Monografía sobre Ojo Guareña, Kaite, 4-5, 415 pp. más Atlas Cartográfico en DIN A-3.

Karampaglidis, T. (2011). Evolución del paisaje y desarrollo del Complejo Kárstico de Ojo Guareña (Merindad de Sotoscueva, Burgos), Fundación Villalar, inédito, 19 pp.

Martín, M. Á. (1986a). Karst de Ojo Guareña: descripción morfológica «Unidad Principal» Sector Dédalo Oeste, en G. E. Edelweiss (ed.), Monografía sobre Ojo Guareña, Kaite, 4-5, 137-160.

Martín, M. Á. (1986b). Karst de Ojo Guareña: descripción morfológica «Unidad Principal» Sector Central, en G. E. Edelweiss (ed.), Monografía sobre Ojo Guareña, Kaite, 4-5, 176-182.

Martín, M. Á. (1986c). Karst de Ojo Guareña: descripción morfológica «Unidad Principal» Sector Segunda Axial, en G. E. Edelweiss (ed.), Monografía sobre Ojo Guareña, Kaite, 4-5, 221-233.

Martín, M. Á. (2008). 50 años de la Expedición «Ojo Guareña 1958». «La mayor aventura subterránea del mundo», Cubía, 11, 30-35

Martín, M. Á., Ortega, A. I. (2001). El Complejo Kárstico de Ojo Guareña (Merindad de Sotoscueva, Burgos), SEDECK, 2, 36-42.

Martín, M. Á., Domingo, S. Antón, T. (1981). Estudio de las cavidades de la zona BU-IV.A (Sierra de Atapuerca), Kaite, 2, 41-76.

Martín, M. Á., Ruiz, F., Rioseras, M. Á. (1986). Karst de Ojo Guareña: descripción morfológica «Unidad Principal» Sector Dulla, en G. E. Edelweiss (ed.): Monografía sobre Ojo Guareña, Kaite, 4-5, 161-174.

Olmo, P. del, Ramírez del Pozo, J. (1978). Mapa Geológico de España. Escala 1:50.000. Explicación de la Hoja nº 84, Espinosa de los Monteros.

Ortega, A. I. (2009). La evolución geomorfológica del Karst de la Sierra de Atapuerca (Burgos) y su relación con los yacimientos pleistocenos que contiene, Tesis doctoral (inédita). Universidad de Burgos.

Ortega, A. I., Martín, M. Á. (2011). El Karst de Ojo Guareña. Merindad de Sotoscueva, Burgos, Cubía, 15, 20-39.

Ortega, A. I., Martín, M. Á. (2021). Sierra de Atapuerca: Cuevas, ATA Senderos, 87 pp.

Ortega, A. I., Martín, M. Á., Camacho, A. I., Eraso, A. (1993). Informe de viabilidad y alternativas de acondicionamiento turístico del Complejo Kárstico de Ojo Guareña (Merindad de Sotoscueva, Burgos). Junta de Castilla y León. Valladolid. Inédito.

Ortega, A. I., Pérez-González, A., Martín, M. Á., Carretero, J. M., Arsuaga, J. L. (2005). El Sistema Cueva Mayor-Cueva del Silo: un estudio morfogenético del endokarst de la Sierra de Atapuerca (Burgos, España), en M. Santonja, A. Pérez-González y M. J. Machado (eds.), *Geoarqueología y Patrimonio en la Península Ibérica y el entorno mediterráneo*, 161-179.

Ortega, A. I., Benito-Calvo, A., Porres, J., Pérez-González, A., Martín, M. Á. (2010). Applying Electrical Resistivity Tomography to the Identification of Endokarstic Geometries in the Pleistocene Sites of the Sierra de Atapuerca (Burgos, Spain), *Archaeological Prospection*, 17, 233-245.

Ortega, A. I., Pérez-González, A., Benito-Calvo, A., Martín, M. Á. (2011). El Karst de la Sierra de Atapuerca. Estudio Geomorfológico, *Cubía*, 15, 70-88.

Ortega, A. I., Benito-Calvo, A., Porres, J. Á., Pérez-González, A., Martín, M. Á. (2012a). Prospección Geofísica por Tomografía Eléctrica en el karst de la Sierra de Atapuerca, *Cubía*, 16, 34-48.

Ortega, A. I., Martín, M. Á., G. E. Edelweiss (2012b). Cuevas de Atapuerca. Una visión de la mano del Grupo Espeleológico Edelweiss. Diputación Provincial de Burgos, 271 pp.

Ortega, A. I., Martín, M. Á., G. E. Edelweiss (2013a). Cuevas de Ojo Guareña. Una visión de la mano del Grupo Espeleológico Edelweiss. Diputación Provincial de Burgos, 311 pp.

Ortega, A. I., Benito-Calvo, A., Pérez-González, A., Martín, M. Á., Pérez, R., Parés, J. M., Aramburu, A., Arsuaga, J. L., Bermúdez de Castro, J. M., Carbonell, E. (2013b). Evolution of multilevel caves in the Sierra de Atapuerca (Burgos, Spain) and its relation to human occupation, *Geomorphology*, 196, 122-137.

Ortega, A. I., Benito-Calvo, A., Pérez-González, A., Carbonell, E., Bermúdez de Castro, J. M., Arsuaga, J. L. (2014). Atapuerca Karst and its Palaeoanthropological Sites, in F. Gutiérrez and M. Gutiérrez (eds.), *Landscapes and Landforms of Spain*. World Geomorphological Landscapes, cap. 8, Springer Science, 101-110.

Ortega, A. I., Benito-Calvo, A., Martín, M. Á., Pérez-González, A., Parés, J. M., Bermúdez de Castro, J. M., Arsuaga, J. L., Carbonell, E. (2018). Las cuevas de la Sierra de Atapuerca y el uso humano del paisaje kárstico durante el Pleistoceno (Burgos, España), *Boletín Geológico y Minero*, 129 (1), 83-106.

Pérez-González, A., Parés, J. M., Carbonell, E., Aleixandre, T., Ortega, A. I., Benito-Calvo, A., Martín, M. Á. (2001). Géologie de la Sierra de Atapuerca et stratigraphie des remplissages karstiques de Galería et Dolina (Burgos Espagne). *L'Anthropologie*, 105, 27-44.

Plana, P. (1969). Resumen de otro año de exploraciones en Ojo Guareña (Burgos), *Geo y Bio Karst*, 20-21, 5-10.

Plana, P. (1970). Notas para el estudio de la Segunda Galería Axial del Complejo Cárstico de Ojo Guareña (Burgos), *Espeleoleg*, 13, 612-623.

Rioseras, M. Á., Burgui, M. (2010). Campaña de buceo Villallana 2009. Villallana-Torcona. Ojo Guareña, Cubía, 13, 14-19.

Robador, A., Samsó, J.M, Ramajo, J., Barnolas, A., Clariana, P., Martín, S., Gil, I. (2022). Mapa Geológico Digital continuo E. 1:50.000, Zona Pirineos Vasco-Cantábrica (Zona-1600), en GEODE. Mapa Geológico Digital continuo de España. Disponible en <http://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/geodezona.aspx?Id=Z1600>.

Rosas, A., Huguet, R., Pérez-González, A., Carbonell, E., Bermúdez de Castro, J. M., Vallverdú, J., Made, J. v. d., Allué, E., García, N., Martínez, R., Rodríguez, J., Sala, R., Saladie, P., Benito, A., Martínez, C., Bastir, M., Sánchez, A., Parés, J. M. (2006). The «Sima del Elefante» cave site at Atapuerca (Spain). *Estudios Geológicos*, 62, 327-348.

Ruiz, F. (2002). Cronología de las referencias hidrogeológicas en torno al Karst de Ojo Guareña, Cubía, 4, 14-31.

Saint-Aubin, J., Val, J. del (1980). Estudio de los pendants. Un modelo sobre su génesis en Ojo Guareña, *Actas Espeleológicas. VIII Simposium d'Espeleología. M-I. Hidrogeología del Karst*, 69-100.

Sanz, R. (1959). Mapa Geológico de España escala 1:50.000. Explicación de la hoja nº 84 Espinosa de los Monteros (Burgos-Santander), 62 pp. y 13 lám.

Serrano, E. (1995). Geomorfología Glaciar del Alto Trueba (Burgos). *XI Jornadas de Campo de Geografía Física*, 91-102.

Serrano, E. (1996). El Complejo morrénico frontal del Valle del Trueba (Espinosa de los Monteros, Burgos), en A. Grandal y J. Pagés (eds.), *IV Reunión de Geomorfología, S.E.G., O Castro (A Coruña)*, 505-517.

Serrano, E. Gutiérrez, A. (2002). El glaciarismo pleistoceno en la vertiente meridional de la Cordillera Cantábrica (Montañas de Palencia, Cantabria y Burgos), *Geomorfología y paisaje. Guía de excursiones. SEG-Dpto. Geografía UVA*, 91-161.

Serrano, E., González, J. J., Turu, V., Ros, X. (2011). Cronología glaciar pleistocena en el Valle de Trueba (Cordillera Cantábrica): primeras dataciones, *Resúmenes XIII Reunión Nacional de Cuaternario Andorra 2011*, 3-6.

Vallejo, M., Eraso, A. (2001). Ojo Guareña: el complejo subterráneo más grande de España, en M. Del Pozo, J. J. Durán, A. Fernández, C. García, J. M. Murillo (eds.), *Aguas subterráneas, paisaje y vida: acuíferos de España, IGME*, 346-353. ●