

# Exploración geofísica para la caracterización hidrogeológica del entorno del Aljibe de la Lluvia, en el conjunto monumental de la Alhambra y el Generalife (Granada, Sur de España)

*Geophysical prospecting for the hydrogeological characterization of the surroundings of the Aljibe de la Lluvia, in the monumental complex of the Alhambra and the Generalife (Granada, southern Spain)*

Pablo Pérez-Vizcaino<sup>1</sup>, Luis José García-Pulido<sup>2</sup>, Antonio González-Ramón<sup>1</sup>, Carlos Marín-Lechado<sup>1</sup>, Sergio Martos-Rosillo<sup>1</sup> y Ana Ruiz-Constán<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España, Consejo Superior de Investigaciones Científicas IGME-CSIC, Granada, Spain; [perezvizcainopablo@gmail.com](mailto:perezvizcainopablo@gmail.com); [antonio.gonzalez@igme.es](mailto:antonio.gonzalez@igme.es); [c.marin@igme.es](mailto:c.marin@igme.es); [s.martos@igme.es](mailto:s.martos@igme.es); [a.ruiz@igme.es](mailto:a.ruiz@igme.es)

<sup>2</sup> Escuela de Estudios Árabes, Consejo Superior de Investigaciones Científicas EEA-CSIC, Granada, Spain. [luis.garcia@eea.csic.es](mailto:luis.garcia@eea.csic.es)

## ABSTRACT

In the highest part of the hill where the monumental complex of the Alhambra and the Generalife is located, in the Dehesa del Generalife (Granada, Spain) there is an extensive hydraulic complex, from the Nasrid period, which could have been fed by groundwater captured from the Aljibe de la Lluvia. This paper presents the results of a geophysical prospecting survey performed to determine if there hydrogeological conditions to explain the presence of a spring in the Alhambra Formation. The results explain why the water emerges in the vicinity of the cistern and contribute to reinforcing the theory that this spring could condition the establishment of the Alberca Rota hydraulic complex, which was the node that made it possible to supply water to the royal Nasrid countryhouses of Alixares (Qaṣr al-Dishār) and Dār al-'Arūsa (Casa de la Novia), built in the last third of the 14th century.

**Key-words:** Electrical Resistivity Tomography, spring supply, Nazarí hydraulics.

Geogaceta, 73 (2023), 3-6

<https://doi.org/10.55407/geogaceta95534>

ISSN (versión impresa): 0213-683X

ISSN (Internet): 2173-6545

## Introducción

La geología y el agua son dos de las señas de identidad más destacadas de la ciudad palatina de la Alhambra, situada en la ciudad de Granada. Su nombre, Alhambra, *ḥiṣṣ al-ḥamrā* o castillo rojo, obedece al color de la formación geológica sobre la que se asienta (Formación Alhambra), constituida por un conglomerado de origen aluvial. El agua, proveniente de las acequias que parten del río Darro, y su total integración, tanto en la arquitectura como en el paisaje, contribuyen a que este conjunto monumental sea Patrimonio de la Humanidad.

Por encima del Generalife, en la denominada Dehesa del Generalife, que se extiende, sobre todo, en la vertiente N del Cerro del Sol, hacia oriente, se

encuentran, diseminados los restos de un extenso complejo hidráulico y arquitectónico vinculado a la Alhambra y que está formado por los yacimientos arqueológicos integrados en las almunias reales nazaríes de Dār al-'Arūsa y los Aljibes, con estructuras hidráulicas tales como el Albercón del Negro, la Alberca Rota y los Pozos Altos del Cerro del Sol o fortificaciones como la Silla del Moro (Fig. 1). La configuración y el funcionamiento hidráulico de este complejo parecen estar vinculados a la presencia de algunos manantiales colgados en la Formación Alhambra. Manantiales que en la actualidad se encontrarían desaparecidos o prácticamente agotados por la actual situación climática, más cálida que la que se dio en el Óptimo Climático Medieval (García-Alix, et al., 2020), por la elevada

## RESUMEN

En la parte más elevada del cerro donde se ubica el conjunto monumental de la Alhambra y el Generalife, en la Dehesa del Generalife (Granada, España) se sitúa un extenso complejo hidráulico, de época nazarí, que pudiera haber sido alimentado por el agua subterránea captada desde el Aljibe de la Lluvia. En este trabajo se presentan los resultados de una campaña de prospección geofísica con la que se ha pretendido determinar si se dan las condiciones hidrogeológicas que expliquen la presencia de un manantial colgado dentro de la Formación Alhambra. Los resultados conseguidos explican por qué surge el agua en las inmediaciones del aljibe y contribuyen a reforzar la teoría que apunta a que este manantial pudo condicionar el establecimiento del complejo hidráulico de la Alberca Rota, que fue el nodo que posibilitó el suministro de agua a las almunias reales nazaríes de los Alixares (Qaṣr al-Dishār) y Dār al-'Arūsa (Casa de la Novia), construidas en el último tercio del siglo XIV.

**Palabras clave:** Tomografía Eléctrica, manantial para abastecimiento, hidráulica nazarí.

Fecha de recepción: 12/07/2022

Fecha de revisión: 28/10/2022

Fecha de aceptación: 02/12/2022

densidad de coníferas de repoblación ubicadas en la zona cimera del cerro (Fig. 2) y por ciertas intervenciones en el territorio que pudieran haber destruido las galerías de drenaje subterráneas que los alimentaban. Entre las distintas hipótesis planteadas, García-Pulido (2013) apunta la posibilidad de que este complejo hidráulico partiera de un manantial o de una zona de surgencia difusa asociada al Aljibe de la Lluvia, dado que esta estructura subterránea sigue recibiendo un pequeño aporte de agua a día de hoy y a que cuenta con la altitud suficiente para poder aprovisionar a todo este complejo hidráulico sin la necesidad de ninguna elevación adicional (Fig. 3).

El Aljibe de la Lluvia consiste en un depósito medieval, de planta cuadrada, con unos 7,5 m de lado interior, en el que

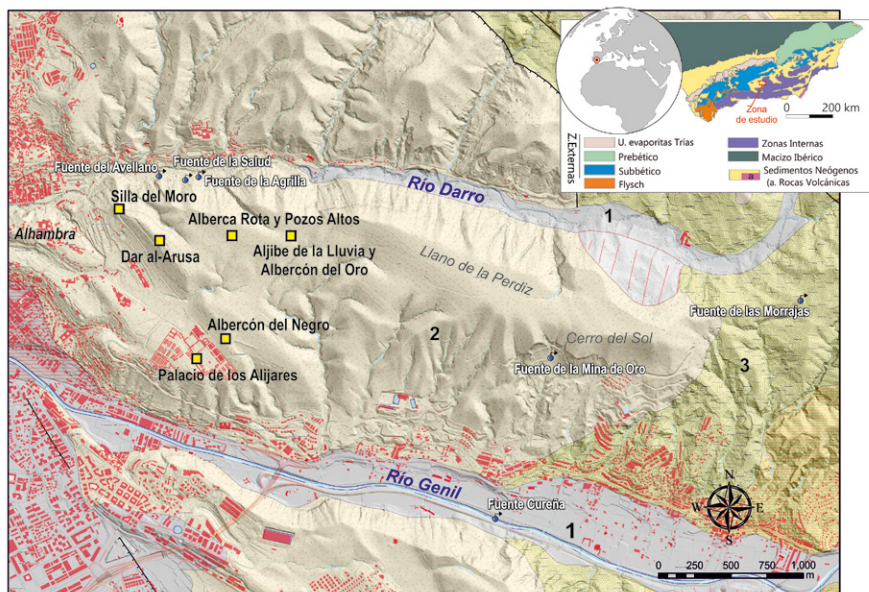
dos tercios de su estructura están por debajo del terreno. Se sitúa a 933 m s.n.m. junto al camino que une el cementerio de Granada con el área recreativa del Llano de la Perdiz. Dispone de tres pequeñas galerías subterráneas, no exploradas, en su cara NE; dos situadas a 2,5 m del fondo y otra a 0,5 m. Este aljibe cuando rebosa lo hace hacia el Albercón del Oro (una balsa de construcción más reciente), situado a escasos metros de distancia, por una conducción enterrada que los comunica (García-Pulido, 2013).

Desde el punto de vista geológico, el aljibe se ubica sobre una falla normal de dirección N130E, que buza unos 70° hacia el suroeste y cuyo trazado coincide con el barranco del Aljibe de la Lluvia (Azañón et al., 2004). La presencia de esta falla y la existencia de 1,6 km<sup>2</sup> de afloramientos de la Formación Alhambra por encima de este punto de surgencia explicarían la posición del manantial, siempre y cuando existiese, bajo el mismo, un nivel de baja permeabilidad que permita el afloramiento del agua subterránea. El principal objetivo de este trabajo ha consistido en diseñar, realizar e interpretar una campaña de prospección geofísica para estudiar la geometría y la naturaleza de los estratos de la Formación Alhambra existentes bajo el Aljibe de la Lluvia de la Dehesa del Generalife.

### Contexto hidrogeológico

La Formación Alhambra está compuesta por cantos redondeados de naturaleza metamórfica con intercalaciones de arenas y limos procedentes de la denudación de Sierra Nevada. Se trata de abanicos aluviales depositados durante el Plioceno y el Pleistoceno inferior. Su espesor visible es de unos 250 m y se encuentran ligeramente inclinados hacia la Depresión de Granada (Martín y Braga, 1997).

El nivel piezométrico viene marcado por el nivel de base impuesto por el aluvial de los ríos Darro y Genil y de la Vega de Granada, a cotas en torno a 750 m s.n.m. en la zona donde se localiza el Aljibe de la Lluvia. Se conocen varios manantiales en el entorno, los más populares son las fuentes del Avellano, de la Salud y de la Agrilla, ubicados en la ladera norte y colgados unos 20-30 m sobre el cauce del río Darro. Estos se relacionan con las infiltraciones de las acequias que alimentan a la Alhambra, que discurren por esa misma ladera a cota superior. En la ladera S se conoce otro manantial colgado, fuente de



**Fig. 1.- Localización geográfica en el contexto de la Cordillera Bética y contexto hidrogeológico del Aljibe de la Lluvia. 1: Depósitos aluviales cuaternarios; 2: Conglomerado Alhambra; 3: Limos de Cenés-Jun. Ver figura en color en la web.**

*Fig. 1.- Geographic location of the area in the Betic Cordillera and hydrogeological context of the Aljibe de la Lluvia. 1: Quaternary alluvial deposits; 2: Alhambra conglomerates; 3: Cenés-Jun silts.*

la Mina de Oro (conocetusfuentes.com), que también podría tener relación con la infiltración del llamado Canal de los Franceses (Canal del Aguas Blancas), que en nuestros días abastece a Granada desde el Embalse de Quéntar.

No existen estudios hidrogeológicos específicos de la Formación Alhambra en el Cerro del Sol, pero el buzamiento, con cierta componente O de los conglomerados y las condiciones de contorno que imponen los ríos Genil y Darro, hacen suponer que la recarga procedente de la infiltración de la precipitación y la de las pérdidas de las acequias, se drenará hacia los dos ríos,

existiendo, probablemente una divisoria hidrogeológica que puede coincidir con la dirección E-O, aproximadamente, del eje del Cerro del Sol. La presencia de algunos niveles arcillosos y su intersección con barrancos o cambios bruscos de pendiente puede dar lugar a la aparición de pequeños manantiales colgados, como el que se investiga en este trabajo.

### Metodología

Se realizaron dos perfiles de tomografía eléctrica situados unos 6 metros al O de la entrada del Aljibe de la Lluvia



**Fig. 2.- Vista aérea del barranco del Aljibe de la Lluvia que desciende desde el Cerro del Sol al valle del río Darro, atravesado por diversas canalizaciones de la Alhambra, en cuya cabecera se encuentra la cisterna que le da nombre.**

*Fig. 2.- Aerial view of the Aljibe de la Lluvia ravine that descends from Cerro del Sol to the Darro river valley, crossed by various Alhambra canals, at whose head is located the cistern that gives it its name.*



(Fig. 4), mediante un equipo ABEM Terra-meter LS2 y un sistema compuesto por 4 bobinas de cable de 100 m de longitud cada una, 80 electrodos y conectores para emitir y recibir la electricidad del terreno mediante pulsos de polaridad opuesta con una intensidad máxima de 1 amperio. El uso de esta técnica geofísica es idóneo ya que existe contraste de resistividad entre los niveles poco permeables, de naturaleza arcillosa, y los niveles más permeables de conglomerados de la Formación Alhambra.

Ambos perfiles (Fig. 4) tienen orientación N-S. El perfil 1 se adquirió con un espaciado entre electrodos de 1 m y una longitud total de 80 m. Posteriormente, sobre la misma traza, pero restringido a la parte central del perfil, se realizó un segundo, con un espaciado de 0,5 m y longitud total de 40 m, con el objetivo de tener una imagen más detallada de la parte más superficial. Para este trabajo se ha seguido el protocolo Multiple Gradient, diseñado para sistemas de medida multicanal (Dahlin y Zhou, 2006) ya que realiza las medidas en dos ciclos combinados que ofrecen un gran volumen de datos en la parte más superficial y una resolución superior al método Wenner y al Schlumberger.

Las medidas de resistividad de cada perfil fueron analizadas mediante un proceso de tres etapas. En primer lugar, se incorporaron los datos de topografía de los perfiles a partir del modelo digital del terreno MDT02 del IGN (Instituto Geográfico Nacional; IGN, 2022). Seguidamente, estos ficheros fueron introducidos en el software Res2Dinv (ABEM, 2016) con el objetivo de eliminar valores anómalos. Finalmente, se realizó la inversión de los datos (Dey and Morrison, 2005) para así obtener una distribución 2D de la resistividad eléctrica en el subsuelo.

En ambos perfiles se realizó una inversión suavizada utilizando el método de mínimos cuadrados (Loke et al., 2003). Se ha utilizado una malla cuyas celdas aumentan de tamaño en profundidad, con 2 nodos por unidad de espaciado entre electrodos y un factor de amortiguamiento inicial (damping factor) de 0,3. El perfil 1 consta de un total de 1219 datos, el modelo óptimo (error absoluto 1,5%) se obtuvo tras 4 iteraciones y se alcanzó una profundidad máxima de 17 m. Para el perfil 2 se usaron 1306 datos, el modelo de resistividad óptimo se obtuvo con 4 iteraciones (error de 1,6%) y se alcanzó una profundidad máxima de 9 m.



**Fig. 3.- Vista aérea desde el O del Cerro del Sol con el yacimiento de la Alberca Rota en primer plano, y el Aljibe de la Lluvia en el pie de monte occidental del Llano de la Perdiz.**

*Fig. 3.- Aerial view from the W of Cerro del Sol with the Alberca Rota site in the foreground, and the Aljibe de la Lluvia at the western foot of the Llano de la Perdiz.*

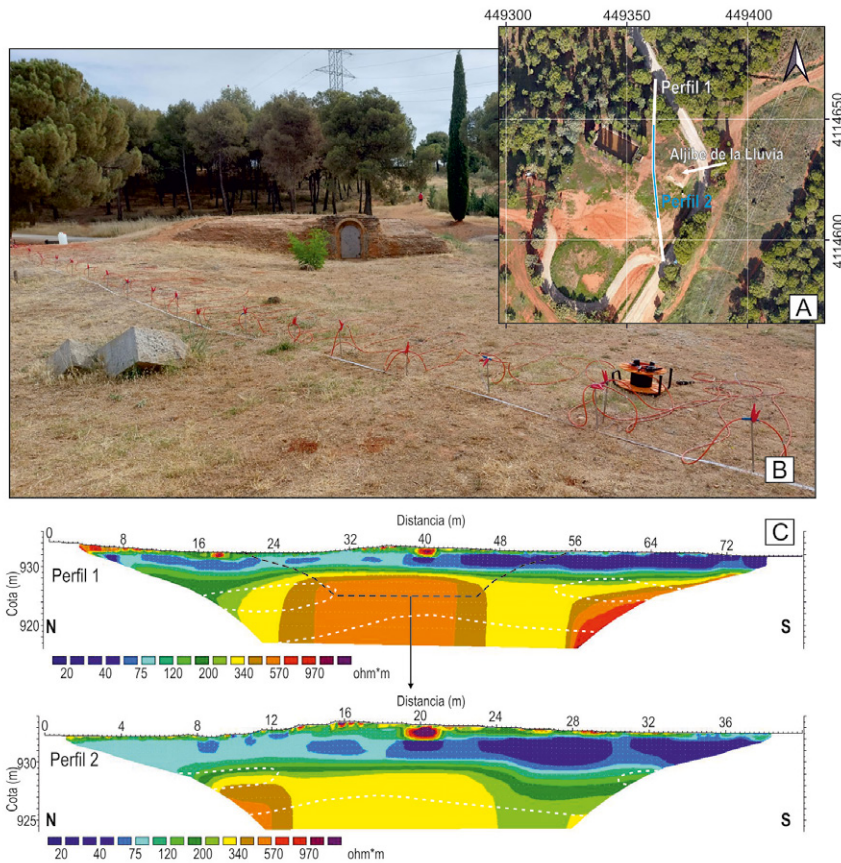
Para calcular el índice de profundidad de investigación (depth of investigation, DOI), se realizaron dos inversiones con una resistividad de referencia del segundo modelo 100 veces mayor que en el primero (Loke, 2012). Este valor se acerca a cero donde las dos inversiones producen iguales valores de resistividad, independientemente del valor del modelo de referencia (Robert et al., 2011). Se ha utilizado un valor de corte de 0,2 (Marescot et al., 2003) que se muestra en ambos modelos como una línea blanca (Fig. 4C).

## Resultados y discusión

El modelo de resistividad del perfil 1 muestra una capa superficial con fuertes contrastes de resistividad en la que se observan valores entre 120-250  $\Omega\cdot m$ , que alternan con zonas de mayor resistividad que alcanzan los 970  $\Omega\cdot m$ . La potencia de este nivel es irregular, alcanza 1,5 m de espesor en torno al metro 20, mientras que en la parte más meridional del perfil su espesor es mínimo o, incluso, desaparece. Por debajo, existe otra capa más homogénea y continua, con valores de resistividad de 20-90  $\Omega\cdot m$ , en la que se aprecia un aumento de espesor desde unos 2,5 m en la mitad norte del perfil, hasta un máximo de 4 m en la mitad sur que podría estar relacionada con la existencia de una falla que hundiría el bloque S. Finalmente, en la parte más profunda aparece un tercer nivel con resistividades superiores a 200  $\Omega\cdot m$ . El perfil 2 corrobora los resultados descritos y permite definir con mayor precisión la potencia de las diferentes unidades.

Teniendo en cuenta los valores de resistividad y las observaciones de campo, la capa irregular más superficial se interpreta como un depósito en el que abundan cantos detríticos de rocas metamórficas que se encontrarían englobados en una matriz arenosa-limosa. Es importante destacar el valor elevado de resistividad y geometría circular que se observa en el perfil 1 y en el perfil 2 en torno al metro 40 y 20, respectivamente. Este rasgo, por su ubicación y características, se corresponde con un conducto que comunica el Aljibe de la Lluvia con el Albercón del Oro, un estanque situado 15 metros al oeste. El segundo nivel, con valores de resistividad bajos y relativamente homogéneos, se correspondería con un nivel menos permeable con abundancia de arcillas conductoras. Por último, en la parte más profunda se ubicaría un nivel más conglomerático y permeable.

La existencia de este nivel arcilloso en el bloque hundido de una falla y el afloramiento de 1,6 km<sup>2</sup> de conglomerados por encima del manantial captado por el Aljibe de la Lluvia explican la existencia de este manantial, cuyo emplazamiento y permanencia no han pasado desapercibidos a lo largo de la historia. En ese sentido, Joris Hoefnagel, en 1564, dibujó este aljibe, su camino de acceso y varios viandantes portando cántaros con sus afamadas aguas, a las que se atribuían poderes curativos. Otras referencias de los siglos XVI y XVII hablan de la calidad de las aguas del aljibe y de que mantenían su nivel constante, incluso tras saciar la sed de un regimiento de soldados (Henríquez de Jorquera in, García-Pulido, 2013). Luis Seco de Lucena Escalada, en 1884, señala



**Fig. 4.- Localización de la posición de los perfiles de Tomografía Eléctrica adquiridos (A), fotografía de la campaña geofísica (B) y modelos de resistividad del perfil 1 y perfil 2 (C). Ver figura en color en la web.**

*Fig. 4.- Geographical location of the Electrical Resistivity Tomography profiles (A) photograph of the field survey (B) and resistivity models of profile 1 and profile 2 (C). See color figure in the web.*

el origen medieval del aljibe y que este es alimentado por un manantial o una mina. Por su parte, las primeras referencias al Albercón del Oro y al rebosadero del aljibe que lo alimentaba, las hace Manuel Gómez-Moreno Martínez en 1889, habiendo sido representado en un plano fechado en 1868 (García-Pulido, 2013).

## Conclusiones

Los dos perfiles de tomografía eléctrica realizados han permitido confirmar la presencia de un nivel continuo y conductor, que se corresponde con un nivel arcilloso de la Formación Alhambra bajo el Aljibe de la Lluvia. La disposición de este nivel arcilloso en el bloque hundido de la falla y la existencia de una importante área de recarga por encima del aljibe, permiten confirmar que se dan las condiciones hidrogeológicas para la formación de este manantial colgado en la Dehesa del Generalife.

La cota más elevada de este manantial (933 m s.n.m.) y la mayor recarga de agua subterránea que debía de existir en época nazarí pudieron condicionar el establecimiento del complejo hidráulico de la

Alberca Rota (sobre un promontorio alargado a 450 m al O del Aljibe de la Lluvia y a 926,5 m s.n.m.), donde se tuvo que recurrir a la construcción del Pozo Este para elevar el agua desde la Acequia Real de la Alhambra y la Acequia de Arquillos, en torno a 120 y 60 m por debajo respectivamente (García-Pulido y Mattei, 2019), y así poder asegurar la demanda de agua para las almunias donde el rey nazarí Muhammad V construyó en el último tercio del siglo XIV los palacios de los Aljibes y Dār al-ʿArūsa. Un estudio de mayor detalle y la perforación de unos drenes horizontales en el interior del aljibe permitirían incrementar el caudal del manantial, lo que contribuirá a recuperar parte del rico patrimonio hidráulico del complejo monumental de la Alhambra y el Generalife.

## Contribución de los autores

Todos los autores han participado en la adquisición de datos, redacción del texto y elaboración de figuras. Pablo Pérez y Ana Ruiz han procesado los datos geofísicos y Ana Ruiz ha coordinado y supervisado el trabajo.

## Agradecimientos

El presente trabajo ha sido financiado por el proyecto REVISE-Betics-PID2020-119651RBI00 del Ministerio de Ciencia e Innovación, el proyecto FIPS-PY20-01387 y los grupos de investigación RNM-126 y RNM-148 de la Junta de Andalucía.

## Referencias

- ABEM, (2016). ABEM Instrument AB, Sundbyberg, Sweden (126 pp.).
- Azañón Hernández, J.M, Azor Pérez, A., Booth-Rea, G. and Torcal, F. (2004). *Journal of Quaternary Science*, 19, 219-227. <https://doi.org/bmrk6c>
- Dahlin, T., Zhou, B. (2006). *Near Surface Geophysics* 4, 113-123. <https://doi.org/bfzr6f>
- Dey, A., Morrison, H.F., (2005). *Geophysical Prospecting*, 27, 1020-1036. <https://doi.org/jdw2>
- García-Alix, A., Toney, J.L. Jiménez-Moreno, G., Pérez-Martínez, C., Jiménez, L., Rodrigo-Gámiz, M., Scott Anderson, R., Camuera, J., Jiménez-Espejo, F.J., Peña-Angulo, D. and Ramos-Román, M.J. (2020). *Clim. Past*, 16, 245-263. <https://doi.org/jdw3>
- García-Pulido, L.J. (2013). *El territorio de la Alhambra: análisis de un paisaje cultural remarcable. Granada*. Universidad de Granada y Patronato de la Alhambra y Generalife.
- García-Pulido, L.J., Mattei, L. (2019). In: *Ciencias de la naturaleza en al-Andalus. Textos y estudios, X*, Caravaza Bravo, J.M.<sup>a</sup> y Benítez Fernández, M. (eds). Madrid, CSIC; 147-167.
- IGN, (2022). *Centro descargas CNIG*, <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>
- Loke, M.H., Acworth, I., Dahlin, T., (2003). *Exploration Geophysics*, 34, 182-187. <https://doi.org/b8j2vc>
- Loke, M.H., (2012). *Geotomo Software Company*.
- Marescot, L., Loke, M.H., Chapellier, D., Delaloye, R., Lambiel, C., Reynard, E. (2003). *Near Surface Geophysics*, 1, 57-67. <https://doi.org/fnzmz4>
- Martín J.M., Braga J.C. (1997). In: *Avances en el conocimiento del Terciario Ibérico*, Calvo, J.P., Morales J. (eds). Univ. Complutense, Madrid, Spain; 117-120.
- Robert, T., Dassargues, A., Brouyère, S., Kaufmann, O., Hallet, V., Nguyen, F., (2011). *Journal of Applied Geophysics*, 75 (1), 42-53. <https://doi.org/bmw7c8>