

## Estructuras de licuefacción sísmica en el yacimiento romano de La Magdalena, Complutum s. IV AD (Madrid, España)

### *Seismic liquefaction structures in the archaeological site of La Magdalena, ancient Roman city of Complutum 4th century AD (Madrid, Spain)*

M.A. Rodríguez-Pascua<sup>1</sup>, P. G. Silva<sup>2</sup>, M.A. Perucha<sup>1</sup>, J. L. Giner-Robles<sup>3</sup>, C. Heras<sup>4</sup>,  
A. B. Bastida<sup>4</sup>, P. Carrasco<sup>5</sup>, E. Roquero<sup>6</sup>, J. Lario<sup>7</sup>, T. Bardaji<sup>8</sup>, R. Pérez-López<sup>1</sup> y J. Elez<sup>2</sup>

1 Instituto Geológico y Minero de España. Madrid. [ma.rodriguez@igme.es](mailto:ma.rodriguez@igme.es), [r.perez@igme.es](mailto:r.perez@igme.es), [ma.peucha@igme.es](mailto:ma.peucha@igme.es)

2 Dpto. Geología, Escuela Politécnica Superior de Ávila, Universidad Salamanca. Ávila. [pgsilva@usal.es](mailto:pgsilva@usal.es)

3 Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid. Madrid. [jorge.giner@uam.es](mailto:jorge.giner@uam.es)

4 Trébede, Patrimonio Cultural, S.L. Torres de la Alameda. Madrid. [cmheras@trebedecultura.com](mailto:cmheras@trebedecultura.com)

5 Dpto. Ingeniería del Terreno, Escuela Politécnica Superior de Ávila, Universidad Salamanca. Ávila. [pcarrasco@usal.es](mailto:pcarrasco@usal.es)

6 Dpto. Edafología, E.T.S.I. Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. [elvira.roquero@upm.es](mailto:elvira.roquero@upm.es)

7 Facultad de Ciencias. UNED. Madrid. [javier.lario@ccia.uned.es](mailto:javier.lario@ccia.uned.es)

8 Dpto. Geología. Fac. Ciencias, Universidad de Alcalá de Henares. Madrid. [teresa.bardaji@uah.es](mailto:teresa.bardaji@uah.es)

**Resumen:** la antigua ciudad romana de *Complutum* (Alcalá de Henares, Madrid) fue fundada en el s. I AD y fue una de las ciudades más importantes de Hispania. *Complutum* fue destruida, abandonada bruscamente, reubicada y reconstruida en una nueva localización en el s. IV AD. Las causas de la destrucción y la nueva localización de la ciudad son aún una incógnita para la arqueología. En este trabajo se muestran diferentes efectos arqueosismológicos de terremotos (EAEs) afectando al yacimiento de La Magdalena (una explotación agrícola situada a 4 km al NE del núcleo urbano de *Complutum*). El efecto geológico de origen sísmico que afectó al yacimiento es la licuefacción. Se pueden observar diques de arena y cráteres de gravas por explosión afectando a instalaciones romanas, como cisternas, casas o tumbas. Simultáneamente al abandono de La Magdalena también fueron abandonadas de forma brusca la ciudad de *Complutum* y varias villas romanas a lo largo del valle del Henares, en algunos casos con EAEs que pueden asociarse al mismo evento que destruyó el yacimiento de La Magdalena. Estos EAEs podrían estar generados por un terremoto de  $M_w = 5.0-6.6$ , utilizando los límites empíricos de licuefacción y ruptura cosísmica de la falla.

**Palabras clave:** *Complutum*, terremoto, Efectos Arqueosismológicos de Terremotos (EAEs), licuefacción, s. IV AD.

**Abstract:** *The ancient Roman city of Complutum (Alcalá de Henares, Madrid) was founded in the first century AD and it was one of the most important cities of Hispania. Complutum was destroyed, abruptly abandoned, relocated in a new location and rebuilt in the fourth century AD. The destruction of the city and its new location is still a mystery to the archaeologists. In this paper we show different earthquake archaeological effects (EAEs) affecting the La Magdalena site (an agricultural holding located 4 km away from the core of Complutum). The most important earthquake geological effect affecting the site is the occurrence of liquefaction processes (sand dikes and gravel blow craters) affecting roman facilities, such as water tanks, houses or tombs. Several archaeological sites of Roman origin were abruptly abandoned along the Henares valley simultaneously with La Magdalena site and Complutum, in some cases with EAEs with similar origin to those recorded at la Magdalena site that could be associated with the same event that destroyed this site. These EAEs could be associated to an earthquake of  $M_w=5.0-6.6$ , using the empirical limit of liquefaction and fault coseismic rupture.*

**Key words:** *Complutum, earthquake, Earthquake Archaeological Effects (EAEs), Liquefaction, 4<sup>th</sup> century AD.*

### INTRODUCCIÓN

El yacimiento de “La Magdalena” se localiza en el término municipal de Alcalá de Henares, antigua *Complutum* en época romana. Presenta hasta siete fases diferenciadas de ocupación, que se iniciarían con una necrópolis calcolítica con cerámica campaniforme, dos periodos de ocupación industrial de época romana altoimperial que dan paso a una gran necrópolis de inhumación bajoimperial y que culminan en un proceso

de ruralización del territorio con inhumaciones dispersas, tanto en el siglo VI como en el VII e inicios del VIII AD.

A mediados del siglo IV de nuestra era se produce un terremoto posiblemente de ámbito local, que deja claras evidencias en el registro arqueológico, no solo del yacimiento, sino del entorno próximo (Rodríguez-Pascua et al., en prensa). Estos autores asignan una  $M_w$  entre 5,0 y 6,6.

## SITUACIÓN GEOGRÁFICA, GEOLÓGICA Y CONTEXTO ARQUEOLÓGICO

El yacimiento arqueológico de La Magdalena se encuentra localizado en la Cuenca del Tajo, asentado sobre la llanura de inundación del río Henares (Fig.1) a 4 m por encima del cauce actual del río, sobre un meandro del mismo. Los materiales del Holoceno que componen esta llanura de inundación son arenas y canales de gravas con limos arcillosos a techo de la serie, con más de 10 m de potencia en su conjunto.

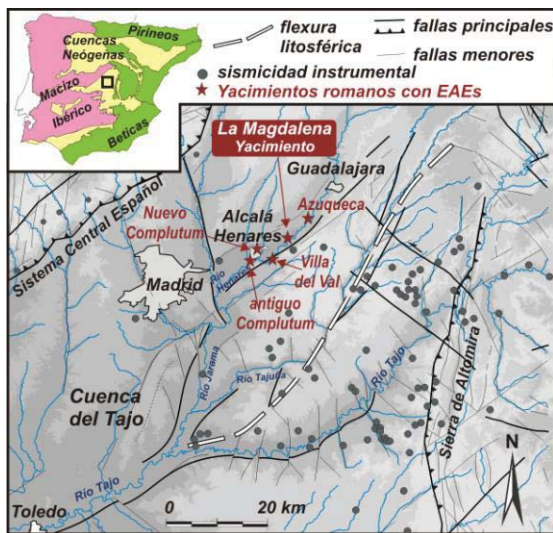


FIGURA 1. Situación geográfica del yacimiento arqueológico de La Magdalena, antigua ciudad romana de Complutum (Alcalá de Henares, Madrid).

## ESTRUCTURAS DE LICUEFACCIÓN

Los restos de época altoimperial romana excavados en este yacimiento presentan evidencias de deformaciones asociadas a fenómenos de licuefacción, clasificados como EAEs dentro de la categoría de efectos geológicos primarios según la clasificación de Rodríguez-Pascua et al., (2011). A continuación se enumeran y describen brevemente este tipo de deformaciones:

*Fracturas abiertas en el sustrato y licuefacciones afectando a construcciones:* estas grietas son de carácter métrico con aperturas que superan los 30 cm. En uno de los casos afectan directamente a una cisterna construida mediante mortero hidráulico (Fig. 2). Las grietas cortan la base de la cisterna y son penetrativas, continuando en el sustrato sobre el que asienta la cisterna. Este tipo de mortero es muy resistente a las cargas y compresiones, por lo que estas grietas no pueden explicarse por la simple ruina de la construcción. En el fondo de la cisterna se han observado dos marcas de impacto, que podrían ser debidas al colapso de los muros laterales. Después de realizar una cata en la base de la cisterna de 1,5 m de profundidad, se ha podido observar de muro a techo que el sustrato sobre el que se asientan los cimientos de la cisterna está compuesto por una capa de arenas y gravas de 50 cm. Sobre estos materiales se depositan



FIGURA 2. Cisterna de mortero hidráulico fracturada por fenómenos de "lateral spreading" producidos durante la licuefacción del sustrato arenoso.

40 cm de arenas siliciclásticas de tamaño de grano medio a grueso con cantos de cuarcita, que intruyen en las capas suprayacentes. Sobre estos materiales hay una capa de limos de matriz arcillosa de 20 cm de potencia, que en su base presenta intrusiones de arena de tamaño decimétrico procedentes del nivel inferior. A techo de la serie encontramos limos arenosos con matriz arcillosa (15 cm) y una capa antropizada de 20 cm de potencia de limos con restos arqueológicos desorganizados. Los procesos de licuefacción se han podido observar en las capas de arenas y gravas inferiores, actuando como niveles confinantes los limos arcillosos que tienen a techo. Estas licuefacciones llegaron a extruir en superficie a través de algunas grietas, rellenando la cisterna de arenas (la cisterna se encontraba llena de estos materiales cuando se realizaron las excavaciones). Algunas de estas grietas también se producen por "lateral spreading" como consecuencia de los procesos de licuefacción que producen el colapso de las estructuras de varias construcciones. En el caso de la cisterna, el hundimiento producido por la extrusión de arenas en superficie genera su agrietamiento y una adaptación de los materiales plásticos infrayacentes (limos arcillosos), que actúan como capas confinantes. En la zona NE del yacimiento se han podido observar construcciones que contaban con escalones de sillería, "hundidos" 3 m con respecto a la cota media del yacimiento a causa de la pérdida de cohesión del sustrato durante la licuefacción.

*Cráteres por explosión de arenas y gravas:* este tipo de estructuras se pueden observar principalmente en la zona N-NW del yacimiento. Esto se debe a que la capa que actúa como confinante en los procesos de licuefacción son las barras de gravas que hay en esta zona. Algunos de estos cráteres afectan a construcciones romanas, concretamente a una cisterna hidráulica (Fig.3A). En este ejemplo es posible observar el conducto de alimentación del cráter, donde las gravas aparecen intensamente fracturadas, con cantos de cuarzo y cuarcita pulverizados, así como

cantos estriados (Fig.4). Estas estrias se producen por la fricción de los granos de arena durante su ascenso. Dentro de este cráter, en el conducto de alimentación, aparecieron 48 herramientas metálicas, como cuchillos,

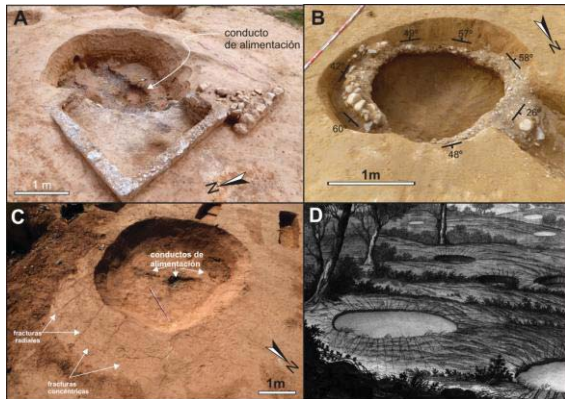


FIGURA 3. Cráteres de arena/grava por explosión: A) Cráter afectando a cisterna hidráulica B) Cráter de arenas con forma de burbuja de la capa de gravas que actuó como capa confinante. C) Cráter de arenas/gravas donde se puede observar el anillo elevado alrededor del cráter con desarrollo de fracturas radiales y concéntricas. D) Cráteres de arena del terremoto de Calabria de 1783 (modificado de Sarconi 1784).

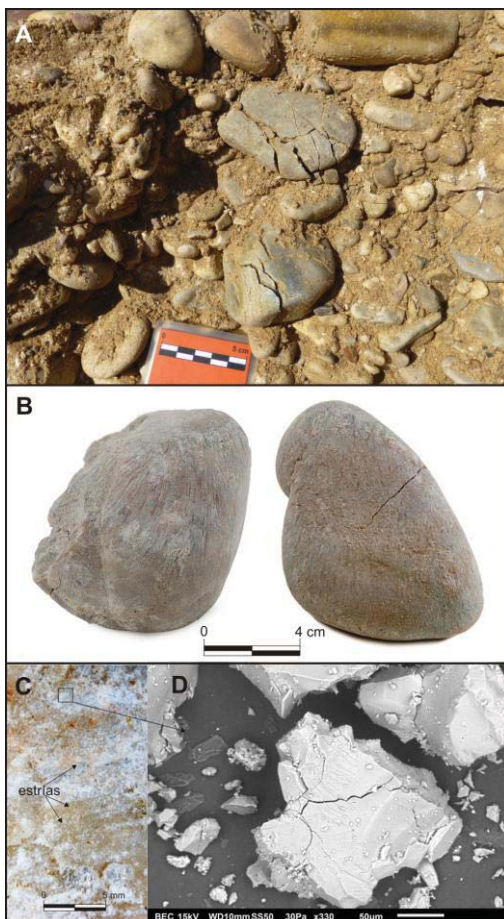


FIGURA 4. Deformaciones en los cantos ubicados en los conductos de alimentación de los cráteres de arena-grava por explosión: A) vista de afloramiento de cantos fracturados en los conductos de alimentación; B) detalle de un canto estriado y fracturado; C) detalle de las estrias y cuarzo pulverizado D) vista de detalle de los fragmentos de la pulverización de cantos de cuarzo y cuarcita;

podones, hachas, etc., de época romana. En otros casos es posible identificar estos cráteres de forma aislada repartidos por el yacimiento (Fig.3B y C), donde la morfología del cráter genera un anillo sobreelevado alrededor del mismo. Esta elevación generó sistemas de fracturas radiales y concéntricas alrededor del cráter, para acomodar la deformación generada por el ascenso de los materiales licuefactados (Fig.5). Este fenómeno también fue observado y documentado durante el terremoto de Calabria de 1783, donde los grabados de época muestran estos cráteres con los sistemas de fracturas descritos (Sarconi 1784; Fig.3D). En otro de los cráteres aislados fueron extraídas 77 herramientas y restos metálicos romanos de la zona del conducto de alimentación (Rodríguez-Pascua et al., en prensa). Es interesante resaltar que la disposición espacial de los cantos fracturados, estriados y el material pulverizado se podría asociar a una morfología de “paraguas invertido” (Fig. 5). El ápice de la estructura sería el conducto de alimentación del cráter y en la parte superior se encontraría la base de una estructura lenticular, cuya parte superior desapareció después de la explosión del cráter. De ahí que los restos que quedan en el cráter tengan estructura de “paraguas invertido”. Las fases de evolución del desarrollo de un cráter de arena por explosión fueron definidas por Gohn et al. (1986): 1) Fase explosiva; 2) Fase de flujo; 3) Fase de colapso y 4) Fase de relleno. Gracias a las observaciones realizadas en el yacimiento de La Magdalena hemos podido realizar un esquema más detallado de la evolución de un cráter de arena por explosión. De este modo podemos diferenciar las siguientes subfases dentro de la fase 1: 1A) Se producen los fenómenos de licuefacción durante e inmediatamente después del terremoto bajo la capa confinante superficial; 1B) el aumento de la presión intersticial tras el reordenamiento de los clastos hace que comiencen a ascender las arenas hacia la superficie, generando abombamientos en la misma; 1C) Este aumento de la presión hidrostática produce la fracturación de los clastos de cuarcita y cuarzo en las zonas de los conductos de alimentación que es donde se concentra la presión. En la fase 2 se producen las extrusiones de material licuefactado en la superficie alimentadas a través de los diques y las explosiones de los cráteres. En la fase 3, fase de colapso, es donde los habitantes de la zona lanzaron las herramientas metálicas al fondo de los cráteres, muy posiblemente para aplacar la ira de los dioses del inframundo que habían destruido primero sus instalaciones con un terremoto y posteriormente con el ascenso a la superficie de agua y arena desde el “inframundo”. En la fase 4 de relleno se termina el relleno continuado de los cráteres, algunos de ellos colmatados con basura del s. XVI.

*Tumbas deformadas:* gran parte de la necrópolis situada en la zona norte del yacimiento, se encuentra alterada con respecto a lo que debió de ser su disposición original. Se ha podido constatar durante la fase de excavación del yacimiento que parte de las

tumbas se encuentran basculadas y algunos de los cuerpos tenían la pelvis desplazada hasta la altura del tórax. Este basculamiento se produjo después de que los huesos perdiesen cohesión muscular entre sí y permitiese su desplazamiento dentro del ataúd (se han encontrado restos de la madera de los mismos, así como de los clavos que habían empleado en su construcción). Estos basculamientos se debieron a intrusiones de arena (diques de arena) que produjeron el movimiento de los ataúdes que llegaron a “flotar” sobre este material fluido, generando el desplazamiento de los restos óseos contenidos en los ataúdes.

## EVIDENCIAS ARQUEOLÓGICAS EN EL VALLE DE HENARES

Con respecto a este último punto, se han podido identificar también abandonos repentinos, incendios y/o cambios bruscos del uso de la construcción en la Casa de Hippolytus (*Complutum*), Casa de los Grifos (*Complutum*) (Rascón Marqués, 2007), Villa de El Val (valle del Henares) (Rascón Marqués *et al.*, 1991), yacimiento del Polígono UG XVI de Azuqueca de Henares (valle del Henares) (Cardín y Cuadrado, 2013) y el abandono brusco de la ciudad de *Complutum* y su nueva ubicación en su posición actual (Pantoja, 2013).

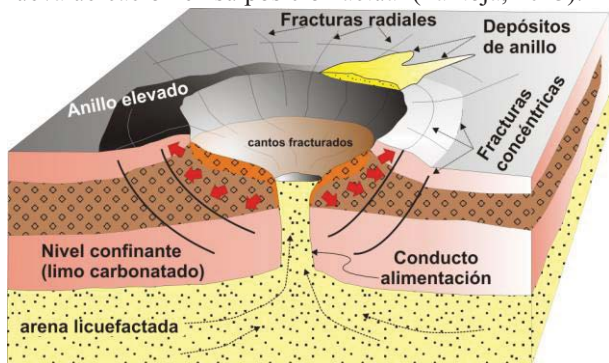


FIGURA 5. Modelo sintético de una sección de un cráter de arena-grava por explosión.

## CONCLUSIONES

Las deformaciones del sustrato observadas en el yacimiento altoimperial romano de La Magdalena, próximo a la ciudad de *Complutum* (actual Alcalá de Henares), están asociadas a fenómenos de licuefacción. El asentamiento fue abandonado de forma repentina. Se han podido observar diferentes EAEs que evidencian la posibilidad de que la destrucción y abandono de este asentamiento romano y la ciudad de *Complutum* en el s. IV fue debida a un episodio de destrucción asociado a un terremoto. Las licuefacciones observadas afectan a las construcciones romanas y se podrían generar con terremotos de  $M_w = 5,0-6,6$  (Rodríguez-Pascua *et al.*, en prensa), para efectos en campo cercano. También se ha contrastado la destrucción y abandono o cambio de uso de varios yacimientos de la misma época en el valle del Henares.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos de investigación: CATESI-07 (IGME) y CGL2012-37281-C02.01 y CGL2015-67169-P (USAL), y CGL2013-47412-C2-2Pes (IGME) una contribución del Grupo de trabajo QTECT-AEQUA. El equipo JEOL JSM 6010LA PLUS ha sido cofinanciada por el FEDER (Proyecto IGME13-4E-1518) y el IGME.

## REFERENCIAS

- Cardín, I. y Cuadrado, M.A (2013): Yacimiento del Polígono UG XVI de Azuqueca de Henares. En: *La romanización en Guadalajara, arqueología e historia*. (M.L. Cerdeño, E. Gamo y T. Sagardoy, Eds.). Ed. La Ergástula, Madrid (España), 137-144.
- Gómez-Pantoja, J. (2013): Complutum y su territorio. En: *La romanización en Guadalajara, arqueología e historia*. (M.L. Cerdeño, E. Gamo y T. Sagardoy, ed.). Ed. La Ergástula, Madrid (España), 63-72.
- Gohn, G.S., Weems, R.E., Obermeier, S.F. y Gelinás, R.L. (1984): Field studies of earthquake-induced, liquefaction-flowage features in the Charleston, South Carolina, area preliminary report. *U.S. Geol. Surv. Open-File Rept.*, 84-67, 35 p.
- Rascón Marqués, S. (2007): La así llamada casa de Hippolytus: la fundación de los anios y la schola de una agrupación colegial de la ciudad romana de Complutum. *Archivo Español de Arqueología*, 80, 119-152.
- Rascón Marqués, S., Méndez Madariaga, A. y del Río Español, P.D. (1991): La Reocupación del mosaico del Auriga Victorioso en la villa romana del Val (Alcalá de Henares). Un estudio de microespacio. *Arqueología, paleontología y etnografía*, 1, 181-200.
- Rodríguez-Pascua, M.A., Pérez-López, R., Silva, P.G., Giner-Robles, J.L., Garduño-Monroy, V.H., y Reicherter, K. (2011): A Comprehensive Classification of Earthquake Archaeological Effects (EAE) for Archaeoseismology. *Quaternary International*, 242, 20-30.
- Rodríguez-Pascua, M.A., Silva, P. G., Perucha, M.A., Giner-Robles, J. L., Heras, C., Bastida, A. B., Carrasco, P., Roquero, E., Lario, J., Bardaji, T., Pérez-López, y R., Elez, J. (In press): Seismically induced liquefaction structures in La Magdalena archaeological site, the 4<sup>th</sup> century AD Roman Complutum (Madrid, Spain). *Sedimentary Geology*. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2016.01.025
- Sarconi, M., (1784): Historia de Fenomeni del Tremuoto avvenuto nella Calabria e nel Valdemone nell'anno: Posti in Luce alla Reale. Acc. Delle Scienze e delle Belle Lettere di Napoli, Napoli, 70 pp.