

## COLABORACIONES EN CIENCIAS DE LA NATURALEZA

### LOS TERREMOTOS COMO PATRIMONIO GEOLÓGICO Y ARQUEOLÓGICO

Cuando se escucha la palabra “terremoto” lo primero que le viene a uno a la cabeza son imágenes de destrucción, especialmente asociada a poblaciones. También surge la repetitiva pregunta de ¿se pueden predecir los terremotos?, ante la cual aparece la recurrente respuesta de “no”. Pero la geología ha avanzado lo suficiente en las últimas cuatro décadas como saber indicar dónde y cómo de grandes serán los terremotos, lo que no se puede hacer es una predicción temporal, aunque sí un pronóstico aproximado al menos del periodo de retorno y/o recurrencia. Este es un grandísimo avance que nos permitirá trabajar en la prevención de sus efectos. Por este motivo, es muy importante aprender de lo que ocurrió en terremotos anteriores para poder prevenir en el futuro, esa es una de las grandes aportaciones de la geología al estudio de los terremotos y a la seguridad del ciudadano. Si sabemos dónde se van a producir los terremotos y que energía máxima pueden liberar deberíamos ser capaces de obrar en consecuencia.

Los terremotos afectan a todo el territorio y dejan su impronta en el paisaje, solo tenemos que tener la formación adecuada para ser capaces de verlo. Otro de los registros sísmicos lo podemos encontrar en los yacimientos arqueológicos y edificios patrimoniales, que también se ven afectados por terremotos. En ambos casos forman parte, tanto de la historia geológica de una zona, como de la historia de la humanidad. Sin embargo, a pesar de que formen parte de nuestra historia, hasta el momento no se ha puesto en valor su patrimonio material. Por ejemplo, tenemos claro que los impactos de artillería que tiene la emblemática Puerta de Alcalá en Madrid, producidos por los artilleros franceses durante los combates de la Guerra de la Independencia, no deben de ser restaurados porque forman parte de nuestra historia, de nuestro patrimonio histórico. Siguiendo este razonamiento, también tendríamos que tener claro que determinados paisajes y efectos de terremotos en nuestro

patrimonio, deberían ser protegidos como testigos de nuestra historia que serán claves para el futuro estudio de los efectos de los terremotos.

### LOS TERREMOTOS EN EL PASADO

Podemos llegar a pensar que algo tan efímero como es el movimiento resulta difícil que pueda ser registrado antes de la invención de determinados instrumentos, como pueda ser la cámara fotográfica o el sismógrafo. Sin embargo, la naturaleza también tiene sus sistemas de registro, tan sensibles en algunos casos, que son capaces de registrar el movimiento producido por un terremoto. Por tanto, mediante la geología seremos capaces de identificar estos terremotos y conocer sus características, antes incluso de la invención de la escritura por parte de la humanidad. Este conjunto de técnicas geológicas las engloba una disciplina conocida como paleosismología, encargada del estudio de los terremotos antes de las primeras crónicas históricas, aunque también se está utilizando para identificar las fuentes sísmicas de terremotos recientes [1]. Por otro lado, y solapándose con la paleosismología, podemos recurrir a la arqueosismología, que estudia los efectos de los terremotos en yacimientos arqueológicos y edificios patrimoniales [2]. Con la invención de la escritura ya podemos encontrar crónicas históricas donde se describen terremotos, estaríamos entrando en la sismicidad histórica, que en muchos casos tiene importantes lagunas de información. La época de la sismicidad histórica termina con la invención del sismógrafo a principios del siglo XX, instrumentación que nos permite saber la energía liberada por el terremoto y su localización, con mayor exactitud después de la década de los 80' del pasado siglo XX. De este modo, podemos diferenciar cuatro tipos de registro sísmico que serán utilizados para conocer la historia sísmica de un área en concreto: paleosismología, arqueosismología, sismicidad histórica y sismicidad instrumental (figura 1).

### Paleosismología

Utilizando diferentes herramientas geológicas como puedan ser: la geomorfología, estratigrafía o la geología estructural; la paleosismología puede saber que fallas

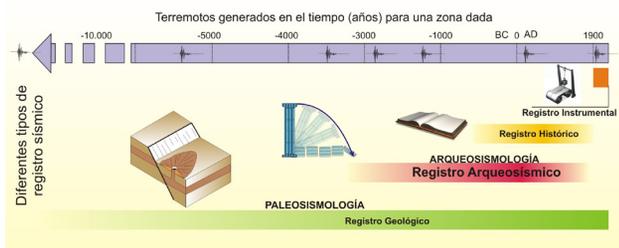


Figura 1. Escala temporal de los diferentes tipos de registro sísmico.

son activas y cuando fue la última vez que produjo un terremoto, además de la energía liberada por el mismo. Si la calidad del registro es buena, se pueden identificar diferentes terremotos producidos por una misma falla, así como su edad [3]. Fundamentalmente existen dos fuentes de registro sísmico en paleosismología, los saltos de falla producidos por terremotos, que se estudian mediante trincheras (figura 2A), y el registro sedimentario de los lagos (figura 2B). Cuando un terremoto tiene una magnitud superior a 6, dependiendo del espesor de la corteza terrestre en esa zona, puede llegar a romper la superficie terrestre, tanto la longitud de la ruptura como

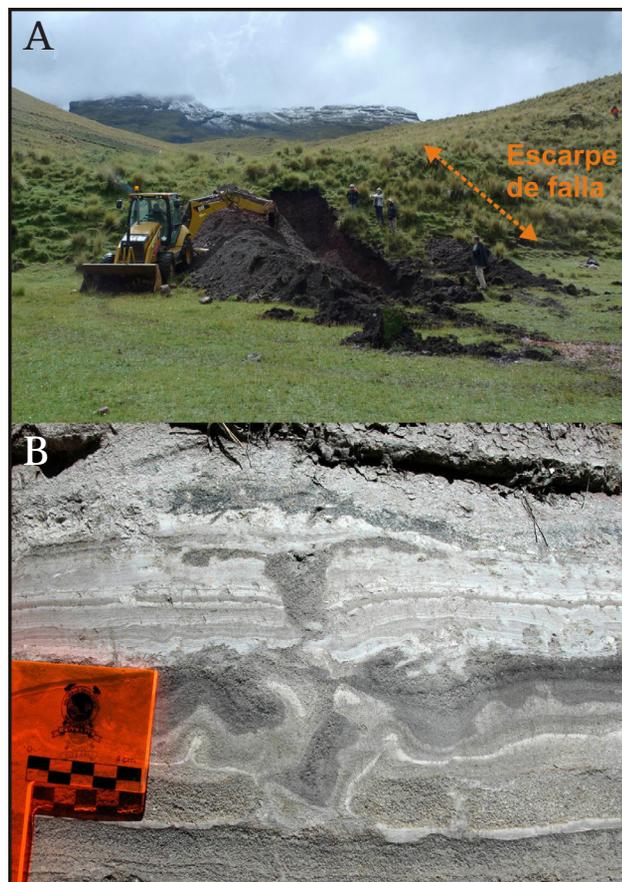


Figura 2. Trincheras realizadas en la falla activa de Pachatusan (Andes, Cuzco, Perú). B) Sismita generada por un terremoto en la Cuenca de Acambay (Acambay, México).

el salto de la falla guardan una relación directa con la energía liberada y por tanto con la magnitud. Con el paso del tiempo, estas rupturas se van borrando por erosión, pero los geólogos son capaces de identificarlas y para tener afloramientos donde estudiarlas se hacen trincheras para observar estos saltos e identificar y cuantificar la historia sísmica de la falla. Los sistemas lacustres, especialmente si son profundos, son medios sedimentarios donde no existe erosión, por lo que queda registrado no solo el sedimento sino los movimientos que pudo sufrir. Así en un lago podemos encontrarnos, registro climático, de inundaciones e incluso terremotos. Los sedimentos del fondo de un lago son muy blandos y un movimiento sísmico puede alterar su disposición horizontal produciendo deformaciones en los mismos, estas estructuras se denominan “sismitas” y reflejan la ocurrencia de un terremoto [3].

### Arqueosismología

Debido a que en zonas intraplaca, como pueda ser la Península Ibérica, los grandes terremotos se espacian mucho en el tiempo, los geólogos necesitamos recurrir a nuevas fuentes de información como la paleosismología, que hemos visto en el apartado anterior. Pero también existen fuentes combinadas, es decir, fuentes de información que integran ciencia y humanidades, como es la arqueosismología. En esta disciplina se requiere la colaboración directa entre geólogos y arqueólogos, ya que estudia estructuras de deformación sísmica en yacimientos arqueológicos y edificios patrimoniales [4]. A pesar de que la arqueosismología abarca todo el periodo durante el cual la humanidad ha dejado restos que han perdurado en los sedimentos y rocas que han podido verse afectados por terremotos, esta disciplina cobra especial importancia con la aparición de las primeras construcciones humanas. Por ejemplo, un periodo muy interesante es el romano, con importantes obras e infraestructuras públicas que han perdurado hasta nuestros días y que sin embargo es muy desconocido a nivel sísmico en España. Muy poca gente sabe que el mundialmente conocido Coliseo de Roma le falta la mitad, no por ruina por el paso del tiempo o errores de los ingenieros romanos, sino porque fue destruido por un terremoto en el siglo XVI. Sus efectos aún son visibles en los bordes de la zona estabilizada para evitar la ruina, con unos Efectos Arqueológicos de Terremotos (*Eathquake Archaeological Effects, EAEs*) muy comunes, como son las caídas de claves de arco (figura 3).



Figura 3. Claves caídas de arco en el Coliseo de Roma, producidas por un terremoto en el siglo XVI.

### Sismicidad Histórica

Como ya se ha comentado, este registro hace referencia a crónicas escritas que describen terremotos. Este registro tiene una gran importancia, ya que nos da información directa y fechada de terremotos pasados. Para cuantificar estos efectos, así como los efectos de terremotos actuales, surgieron escalas de “intensidad”, que mediante estas descripciones asignan un valor numérico a los daños, que en el caso de la célebre escala de Mercalli va de I a XII. Sin embargo, no es oro todo lo que reluce, la limitación de este registro viene dada por varios factores, uno de ellos es la subjetividad del cronista y por otro la pérdida de material de archivo a lo largo de la historia. El caso de países como Italia este registro puede llegar a ser fiable durante más de 2000 años. En el caso de España es fiable hasta el siglo XVI, ya que la información anterior fue destruida en su mayor parte durante la reconquista. Valga como ejemplo el recientemente descubierto Terremoto de Complutum (actual Alcalá de Henares, Madrid) que destruyó esta ciudad romana en la segunda mitad del siglo IV [5] y que no ha quedado registrado en ninguna crónica. Gracias a técnicas arqueosismológicas [6,7], ha podido cuantificarse la magnitud de este terremoto, que fue en un intervalo de entre 5,5 y 6,6.

### Sismicidad Instrumental

El sismógrafo supuso un gran paso hacia delante en el estudio de los terremotos, ya que permite tanto la localización tridimensional del hipocentro del terremoto como el cálculo de la energía liberada mediante la “magnitud”. De este modo ha permitido el desarrollo de disci-

plinas como la sismotectónica, que relaciona la distribución de terremotos con fallas y la dinámica cortical definida por la Tectónica de Placas. Este gran paso hacia delante también supuso un gran retroceso en otros registros, como son los “efectos geológicos de los terremotos” que servían para estimar la localización de terremotos, junto con los datos de intensidades clásicas. Informes geológicos sobre grandes terremotos, como el mítico “Informe Lawson” que describía los efectos geológicos del terremoto de San Francisco de 1906, dejaron de elaborarse porque ya no hacían falta para poder localizar el epicentro. El paso del tiempo ha demostrado que esto fue un error, ya que es tan importante saber dónde y cómo de grande va a ser un terremoto, como que es lo que ocurre durante el terremoto y minutos, horas e incluso días después del mismo. De esto precisamente es de lo que hablaremos en el siguiente apartado.

### ESCENARIOS SÍSMICOS

Se produce un terremoto, puede durar unos segundos o incluso minutos, tiempo muy corto que sin embargo se le puede hacer eterno a uno si lo sufre dentro de un edificio, pero ¿terminó todo cuando cesó la sacudida sísmica?... la respuesta es “no”. El paso de las ondas sísmicas por la superficie terrestre es la que genera la destrucción de nuestras construcciones pero también produce otro tipo de efectos ambientales que son muy importantes. Estos efectos ambientales, entre los que se encuentran los efectos geológicos, van desde la génesis de grandes deslizamientos, pasando por grietas en el sustrato hasta tsunamis. Bien, si nosotros construimos nuestros edificios con un perfecto diseño antisísmico pero no prevenimos que una ladera entera pueda deslizarse como consecuencia del terremoto, nuestra casa aguantó perfectamente el terremoto pero se la llevó por delante un deslizamiento sísmicamente inducido. Existen numerosos ejemplos de estos casos, como el terremoto de 1964 en Niigata en Japón ( $M=7,5$ ), donde los edificios aguantaron perfectamente el paso de la onda sísmica pero se hundieron literalmente en la arena cuando esta pasó a comportarse como un fluido. Este es un fenómeno que se conoce como “licuefacción”, es muy común durante terremotos en zonas donde existan sedimentos no consolidados empapados en agua, como en las llanuras de inundación de los ríos. Este es el fenómeno que ha permitido identificar el terremoto de Complutum del que hablábamos anteriormente. El conjunto de efectos geológicos abarca una determinada área cuando se produce

un terremoto y es lo que se denomina “escenario sísmico”, donde también se incluyen las localidades afectadas y sus daños. Todos estos efectos geológicos fueron eliminados de la nueva escala de intensidades europea EMS-98, ante lo cual la comunidad geológica se reunió para elaborar una nueva escala de intensidades geológica, la cual es conocida en la actualidad como escala ESI-07 [8] (figura 4). La escala de intensidades ESI07 de efectos ambientales de terremotos (EEEs) se basa en la clasificación de los efectos causados por los terremotos sobre las personas, construcciones humanas (edificaciones e infraestructuras) y en el medio natural (efectos ambientales o geológicos). Este parámetro de tamaño sísmico proporciona una estimación de la severidad de la sacudida sísmica teniendo en cuenta los efectos producidos por el rango completo de frecuencias del movimiento ondulatorio así como de las deformaciones estáticas que se produzcan [9]. La importancia de esta escala radica en que no es necesario tener poblaciones para registrar intensidades, como ocurre con las escalas clásicas, sino que los efectos se reparten por todo el territorio, incluidas las poblaciones. Gracias a esto se pueden localizar con mayor precisión la localización epicentral de terremotos históricos, por ejemplo.

### EL ÚLTIMO GRAN TERREMOTO EN ESPAÑA

El terremoto catalogado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) como el de Arenas del Rey (Granada) del 25 de diciembre de 1884 tiene su epicentro en Alhama de

Granada (Granada), mientras que la falla que lo produjo es la de Ventas de Zafarraya (Granada) [10]. Anteriormente era conocido como Terremoto de Andalucía de 1884. Este triple desajuste muestra el problema que puede generar el uso de distintas escalas macrosísmicas, como es el caso la EMS98 en la que se eliminan los efectos ambientales. Se da la paradoja que el informe que realizaron Taramelli y Mercalli (1886) localiza el epicentro sobre esta falla, al pie de la Sierra de Almijares, utilizando las direcciones de movimiento deducidas en los efectos en las construcciones, demostrando la utilidad de este tipo de efectos, que en la actualidad si son conocidos como EAEs. Este terremoto dejó un importante catálogo tanto de EAEs como de EEEs, muchos de los cuales son visibles en la actualidad.

Para este terremoto se han inventariado un total de 35 EEEs, en su mayoría corresponden a movimientos de ladera, con tres grandes deslizamientos como son los de Güevejar, El Guaro (Periana) (figura 5) y Albuñuelas. Los siguientes efectos más abundantes son los hidrológicos (aparición y desaparición de manantiales y cambios de temperatura y caudal, etc.), los cuales se han incluido utilizando las descripciones de época, dado su carácter efímero. También se han encontrado numerosas descripciones de grietas en el sustrato, habiendo separado las que corresponden a cicatrices de cabecera de deslizamiento y la ruptura superficial de la falla que generó el terremoto de efectos de génesis de fracturas aisladas. En el caso de este terremoto, contamos con la descripción y

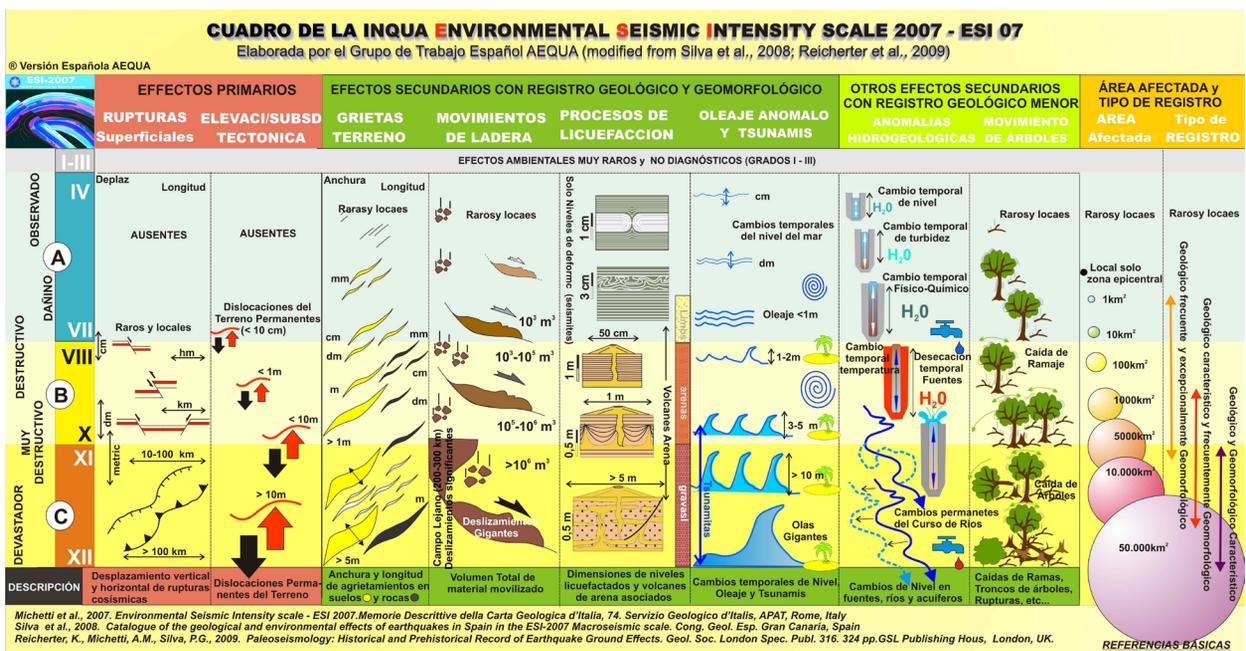


Figura 4. Representación gráfica de la escala de intensidades de efectos ambientales de terremotos ESI-07.



Figura 5. Fotografía de época (Fotógrafo de Alfonso XII) de la cabecera del deslizamiento del Guaro y fotografía actual del mismo escarpe de cabecera del deslizamiento.

contraste en campo de la ruptura superficial de la falla normal de Ventas de Zafarraya, responsable del terremoto. También se han contado con efectos de caída de árboles (algunos visibles en la actualidad) o efectos espeleosismológicos [10]. Este terremoto es un buen ejemplo de un extenso catálogo de EEEs y EAEs que aún se pueden observar sobre el terreno y que deberían protegerse en su conjunto como patrimonio geológico.

## TERREMOTOS Y PATRIMONIO GEOLÓGICO

Los terremotos serían por tanto fenómenos naturales que modelan el paisaje, generando puntos de interés científico que se pueden agrupar en un área, la cual es susceptible de ser protegida para que pase a formar parte de nuestro rico patrimonio natural. En España la ley que protege el patrimonio geológico es la 42/2007 y su modificación en la Ley 33/2015 de *patrimonio natural y biodiversidad*, donde se indica expresamente que son “el conjunto de recursos naturales geológicos de valor científico, cultural y/o educativo, ya sean formaciones y estructuras geológicas, formas del terreno, minerales, rocas, meteoritos, fósiles, suelos y otras manifestaciones geológicas que permiten conocer, estudiar e interpretar: a) el origen y evolución de la Tierra, b) los procesos que la han modelado, c) los climas y paisajes del pasado y presente y d) el origen y evolución de la vida”. El patrimonio geológico está formado por los Lugares de Interés Geológico (LIG), que son cada uno de los elementos geológicos que tienen valor de acuerdo con esta definición y que se reúnen en un inventario formado por fichas y una cartografía de polígonos con los límites de cada LIG.

Esta definición de la Ley nos permite afirmar que los terremotos son procesos geológicos muy significativos en la historia de la Tierra y que algunos de ellos debido a su magnitud y por los efectos causados han dejado evidencias en el registro geológico que merecen ser con-

siderados como patrimonio geológico por su alto valor científico, pero además, debido a la multitud de efectos que ocasionan en otros elementos que no son de origen geológico consideramos que deben incluirse en un apartado destacado en las fichas de los inventarios de LIG. De esta forma, se asegura que el inventario recoge este tipo de procesos geológicos de corta duración pero de grandes implicaciones para la historia geológica de las regiones de estudio y que merecen ser recogidos por su alto valor científico. Sin embargo, la ley 42/2007 deja claro que sólo podemos considerar dentro del inventario aquellos efectos de los terremotos que son de origen natural y geológico, como pueden ser las sismitas, tsunamitas, escarpes de falla, lagunas de obturación entre las trazas de las fallas transformantes, etc.

De esta forma, los terremotos deben recogerse en las fichas de los inventarios de patrimonio geológico de una manera singular. 1) con la denominación de LIG para aquellos elementos geológicos que se han generado por el efecto un terremoto, que cumplen con los parámetros de valoración como son la representatividad del proceso geológico (terremoto), el carácter de localidad tipo o de referencia, el grado de conocimiento científico del lugar, el estado de conservación, las condiciones de observación, la rareza, la diversidad geológica, la espectacularidad o belleza, el contenido divulgativo / uso divulgativo, el contenido didáctico / uso didáctico, la posibilidad de realizar actividades recreativas o de ocio y la asociación con otros elementos naturales o culturales [11]. Los elementos geológicos que pueden incluirse son las sismitas, los escarpes de falla, tsunamitas, espeleotemas con roturas sísmicas, capturas fluviales, etc. Este apartado sólo se podrá cumplimentar para terremotos de época histórica y muy reciente. Es muy difícil que se conserven ENGIG de más de 100 años.

Un apartado 2) que recoja los elementos que son patrimonio geológico efímero (PGE) directamente ocasionados por un terremoto, entendido como conjunto de elementos naturales geológicos de valor científico y/o educativo, normalmente formas del terreno, formaciones y estructuras geológicas, que permiten conocer, estudiar e interpretar sus efectos y cuyos elementos distintivos son de corta duración temporal, incluso inferior a un día [12], como pueden ser: grietas, suelos licuefactados, anomalías hidrogeológicas (cambios físicos y químicos), manantiales secos, etc.

Por último, pero no menos importante, la ficha debe incluir un apartado 3) con los ENGIG (elementos no geo-

lógicos de interés geológico) [13] por su estrecha relación con el terremoto como son los efectos que se manifiestan en árboles rotos, elementos de la arqueosismología, toponimia, leyendas, crónicas históricas, etc. Estos diversos elementos que no son de origen natural (patrimonio histórico-artístico o sobre infraestructuras), o que son de origen natural pero no son elementos geológicos, y que por lo tanto no pueden ser considerados patrimonio geológico, sin embargo aportan información muy valiosa para el estudio de los terremotos.

En conclusión, los terremotos por sí mismos no pueden catalogarse como LIG, pero los efectos que ocasionan tienen un gran valor científico y didáctico. La inclusión en las fichas de los inventarios de los apartados 2) y 3) completarían los EEs para la protección y gestión de estos efectos ligados a los terremotos. Consideramos que pueden alcanzar un creciente valor turístico si se realiza una interpretación correcta mediante paneles y rutas, tanto en espacios naturales protegidos como en otra serie de intervenciones para el geoturismo rural y urbano en regiones que son activas y donde ocurren terremotos frecuentes.

## REFERENCIAS

- [1] McCalpin JP (2009). *Paleoseismology*. 2ª Ed. Academic Press, San Diego.
- [2] Pérez-López R, Rodríguez-Pascua MA (2015). Los terremotos perdidos. IGME-Catarata.
- [3] Masana E, Rodríguez-Pascua MA, Martínez Díaz JJ (2011). Los paleoterremotos: estudiando el pasado para entender el futuro. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* 19(3), 305–316.
- [4] Rodríguez-Pascua MA, Morales Manzanos FJ, Giner-Robles JL, Palomo Lozano I, Martín-González F, Silva Barroso PG, Pérez-López R (2013). La arqueosismología: un nuevo registro sísmico, una herramienta docente y de protección del Patrimonio. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* 21(1), 27–37.
- [5] Rodríguez-Pascua MA, Silva PG, Perucha MA, Giner-Robles JL, Heras C, Bastida AB, Carrasco P, Roquero E, Lario J, Bardaji T, Pérez-López R, Elez J (2016). Seismically induced liquefaction structures in La Magdalena archaeological site, the 4th century AD Roman Complutum (Madrid, Spain). *Quaternary International* 334, 34–46.
- [6] Rodríguez-Pascua MA, Pérez-López R, Silva PG, Giner-Robles JL, Garduño-Monroy VH, Reicherter K (2011). A Comprehensive Classification of Earthquake Archaeological Effects (EAE) for Archaeoseismology. *Quaternary International* 242, 20–30.
- [7] Giner-Robles JL, Silva Barroso PG, Pérez-López R, Rodríguez-Pascua MA, Bardaji Azcárate T, Garduño-Monroy VH, Lario Gómez J (2011). Evaluación del daño sísmico en edificios históricos y yacimientos arqueológicos. Aplicación al estudio del riesgo sísmico. Proyecto EDASI. Serie Investigación. Fundación MAPFRE.
- [8] Michetti AM, Esposito E, Guerrieri L, et al. (2007). Environmental Seismic Intensity scale – ESI 2007. Intensity Scale ESI-07, en: Guerrieri L, Vittori E (Eds.), Mem. Descr. Carta Geologica d'Italia 74. APAT, Rome, Italy.
- [9] Silva PG, Rodríguez-Pascua MA (2016). Peligrosidad y Riesgo Sísmico: Los Terremotos, en: Lario J, Bardaji T (Eds.), Introducción a los Riesgos Geológicos. Editorial UNED, 57–118.
- [10] Rodríguez-Pascua MA, Silva PG, Perucha MA, Giner Robles JL, Elez J, Roquero E (2017). El escenario sísmico del terremoto de Arenas del Rey de 1884 (España). IX Reunión do Quaternário Ibérico, Faro. (en prensa).
- [11] García-Cortés Á, Carcavilla Urquí L, Díaz-Martínez E, Vegas J (2014). Documento metodológico para la elaboración del Inventario Español de Lugares de Interés Geológico (IELIG). Versión 05-12-2014. 64 pp. Acceso 24/01/2017. <http://www.igme.es/patrimonio/descargas.htm>
- [12] Díez-Herrero A, Martín-Duque JF, Vegas J (2013). Catálogo de elementos no geóticos de interés geológico (ENGIG) de la provincia de Segovia. *Cuadernos del Museo Geominero* 15, 371–378.
- [13] Díez-Herrero A, Ortega Becerril JA, Pérez López R, Rodríguez-Pascua MA. (2011). Patrimonio geológico efímero: singularidades de su estudio y gestión, en: Fernández-Martínez E, Castaño de Luis R (Eds.), Avances y retos en la conservación del patrimonio geológico en España. Actas de la IX Reunión Nacional de la Comisión de Patrimonio Geológico (Sociedad Geológica de España), León, 97–103.

Miguel Ángel Rodríguez-Pascua

Área de Investigación en Peligrosidad y Riesgos Geológicos  
Instituto Geológico y Minero de España

Juana Vegas Salamanca

Área de Patrimonio Geológico y Minero  
Instituto Geológico y Minero de España