

Combinación de métodos de datación en cronologías paleosísmicas: el ejemplo de El Saltador (Falla de Alhama de Murcia)

Combining dating techniques in paleo-earthquake chronologies: the example of El Saltador (Alhama de Murcia fault)

M. Ortuño¹, M. Ferrater¹, E. Masana¹, J.J. Martínez-Díaz², R. Pallàs¹, H. Perea³, S. Baize⁴, E. García-Meléndez⁵, T. Rockwell⁶, W.D. Sharp⁷, A. Medialdea⁸, E. Rhodes⁸, P.P. Cunha⁹, R. Sohbaty¹⁰, J.P. Buylaert¹⁰ y A. Murray¹⁰

1 RISKNAT. GEOMODELS. Dept. Geodinàmica i Geofísica, Fac. Geologia, Univ. de Barcelona, 08028 Barcelona, Spain. maria.ortuno@ub.edu

2 Departamento de Geodinámica, Universidad Complutense, Instituto de Geociencias IGEO (UCM, CSIC), 28040 Madrid, Spain

3 Barcelona Center for Subsurface Imaging (B-CSI), Dept. de Geociències Marines - Institut de Ciències del Mar - CSIC, 08003 Barcelona, Spain

4 Institut de Radioprotection et Sûreté Nucléaire - Seismic Hazard Division (BERSSIN), BP 17, 92262 Fontenay-aux-Roses, France

5 Área de Geodinámica Externa, Facultad de CC. Ambientales, Universidad de León, Campus de Vegazana s/n 24071 León, Spain

6 Department of Geological Sciences, San Diego State University, San Diego, CA 92182, USA

7 Berkeley Geochronology Center, Berkeley, CA 94709, USA

8 Department of Geography, University of Sheffield, Sheffield S10 2TN, UK

9 MARE - Marine and Environmental Sciences Centre, Department of Earth Sciences, Univ. Coimbra - Pólo II, 3030-790 Coimbra, Portugal

10 Nordic Laboratory for Luminescence Dating, Department of Geoscience, Aarhus University, Roskilde 4000, Denmark

Resumen: Presentamos la cronología de paleoterremotos establecida para la rama sur de la Falla de Alhama de Murcia (Béticas Orientales) a partir del estudio paleosismológico de la localidad de el Saltador (Lorca). Mostramos la aplicación combinada de cuatro métodos de datación; luminiscencia en cuarzo y feldespato (OSL en cuarzo y *pIR-IRSL*), datación de series de Uranio en carbonatos pedogénicos, y radiocarbono. Para acotar la edad de los paleoterremotos con la mejor definición posible, se han integrado las edades de las capas que definen temporalmente los paleosismos en un modelo deposicional. Para ello se usó el programa OxCal (versión 4.2), que realiza un tratamiento estadístico bayesiano de las funciones de probabilidad de las edades de materiales afectados según un orden estratigráfico conocido y calcula la recurrencia media y la recurrencia particular entre eventos sucesivos. La secuencia de materiales aluviales muestra el registro de ocho eventos paleosísmicos ocurridos desde hace $54,3 \pm 9,1$ ka. El tiempo de recurrencia medio varía entre 3,5- y 5,3 ka, localizándose el último evento entre el s. XIII y el s. XVIII.

Palabras clave: Falla de Alhama de Murcia, paleosismología, dataciones numéricas, análisis bayesiano, Béticas Orientales

Abstract: We present a chronology of paleo-earthquakes established at El Saltador (Lorca), a paleoseismical site in the southern branch of the Alhama de Murcia Fault (Eastern Betics). Because of the difficulties in dating the affected sediments using a single dating approach, we combined four types of methods; Two of them based on the luminescence of quartz and feldspar (Quartz-OSL and *pIR-IRSL*), U-series on pedogenic carbonates and radiocarbon dating. To obtain the best possible accuracy for the age of each paleoearthquake, we integrated the age of the layers that constrain the seismic events into a depositional model. To this end, we relied on the OxCal program (version 4.2), which performs a Bayesian statistical treatment of the probability functions of the ages assigned to a sequence of layers of known stratigraphical order, at the time that it provides the average recurrence and the single recurrence between successive events. The sequence of alluvial deposits analyzed shows the record of eight paleoseismic events occurred since $54,3 \pm 9.1$ ka. The average recurrence intervals ranges between 3,5- and 5,3 ka with the last event taking place between the XIII and XVII centuries.

Key words: Alhama de Murcia fault, paleoseismology, numerical dating, Bayesian analysis, Eastern Betics

INTRODUCCIÓN

En este trabajo, presentamos la cronología de paleoterremotos (en adelante, PTT) establecida para la Falla de Alhama de Murcia (FAM, Béticas Orientales, Fig. 1) a partir del estudio paleosismológico de la localidad de el Saltador. Para ello se ha hecho uso de: 1) la determinación del número mínimo de PTT ocurridos en la falla según el registro estudiado; 2) la integración y discusión de las edades de las capas que

definen temporalmente los PTT provenientes de cuatro métodos diferentes; 3) la obtención de las edades más probables de los PTT mediante el uso del procedimiento propuesto por Lienkaemper and Bronk Ramsey (2009), con el que se realiza un tratamiento estadístico bayesiano de las funciones de probabilidad de las edades obtenidas para cada muestra.

El estudio se centra en la secuencia de materiales del abanico aluvial de El Saltador, deformados por la

actividad de la rama sur de la FAM (FAMS) en el Saltador (Lorca, Fig. 1). La localidad paleosismológica de El Saltador fue estudiada por Martínez-Díaz et al. (2003) y Masana et al. (2004). Estos autores identificaron tres paleoterremotos de magnitud M 6,5-7 ocurridos en los últimos 27 ka, localizando el reciente poco antes del 1650 AD. Recientemente, Ferrater et al. (aceptado) han revisado los parámetros paleosísmicos que se obtienen en la localidad de El Saltador, calculando una tasa de deslizamiento neto para la FAMS de $0,9 \pm 0,1$ mm/a.

IDENTIFICACIÓN DE PALEOTERREMOTOS

La actividad neotectónica de la FAMS en la localidad del Saltador ha dado lugar a la dislocación, repetida en el tiempo, del abanico de El Saltador y las formas y materiales preservados en la superficie tras el abandono del abanico. Ferrater et al. (aceptado) determinan un comportamiento de falla en salto oblicuo (predominantemente siniestro con ligera componente inversa) e identifican desplazamientos por evento medios de 5,1-6,2 m en zanjas paralelas a la traza de la falla. La secuencia aluvial expuesta en las zanjas excavadas muestra capas de gravas y limos, interpretadas como el registro predominante de flujos laminares (formados por alternancia de flujos de derrubios y flujos de lodo que constituyen el registro del abanico de El Saltador) y el registro de flujos canalizados (flujos de derrubios y rellenos graduales de canales incididos en el abanico tras su abandono).

Las zanjas perpendiculares a la falla nos permiten identificar la secuencia de rupturas superficiales (Fig. 1C y D) basándonos en observaciones estratigráficas, sedimentológicas y estructurales que se describen a continuación; **1)** Unos depósitos de flujos de lodo anómalos, representados por siete de las capas identificadas. Éstos recubren la paleotopografía, rellenan los canales y, cuando superan los límites de éstos, forman cuerpos tabulares de base irregular. Esta configuración la interpretamos como el resultado de la aparición repetida en el tiempo de una barrera tectónica tal y como lo discuten Masana et al. (2014); los cuerpos tabulares cubren una gran superficie en comparación con los observados en otras partes del abanico alejadas de la falla, se concentran en el bloque hundido de la falla y no se observan en el bloque levantado. Hemos usado esta interpretación para inferir cuatro de los eventos sísmicos observados (c, e, g y h); **2)** Una evidencia de cambio de ambiente sedimentario representada por la capa I (arenas finas de color lila con laminación cruzada y paralela), que interpretamos como la formación puntual de una zona de baja energía junto a la traza de la falla tras el evento *e*; **3)** Evidencias estructurales basadas en; 3.1, un mayor grado de basculamiento entre paquetes de unidades más antiguas con respecto a las siguientes más jóvenes en la zona de falla. Este criterio se ha usado en todos los eventos menos en el más reciente (evento *a*); 3.2,

Pliegues y fallamientos inversos que afectan sólo a las unidades anteriores al evento sísmico. Estos rasgos se han observado asociados a las fallas Fx, F1, F2 y F3F2 y definen todos los eventos. En el caso de los eventos *a* y *b*, el desplazamiento lateral de canales observado en zanjas paralelas a la traza (descrito por Ferrater et al., aceptado), se suma a las evidencias mencionadas.

DATACIÓN DE UNIDADES LIMITANTES

La Tabla 1 recopila los eventos identificados y las edades de 12 muestras analizadas para datar las unidades que los acotan, localizadas en la Fig. 1 a excepción de SALT31/5, SAL20 y SALT 21, cuya localización puede comprobarse en Ferrater et al. (en revisión) A continuación se describen brevemente los métodos de datación utilizados.

La luminiscencia estimulada ópticamente, OSL, fue medida en granos de cuarzo de 180-250 μm (en grupos de múltiples granos o alícuotas). Se realizaron medidas en los laboratorios de la Univ. de Sevilla, la Univ. de Aarhus y de la Univ. de Sheffield (OSL-1 y OSL-2 respectivamente en la tabla 1). En ésta última, también se midió la luminiscencia estimulada con infra-rojos según el proceso pIR-IRSL en granos aislados de feldespato. Todos los resultados obtenidos pueden considerarse edades deposicionales reales por las características dosimétricas de las muestras. La combinación de errores que da la edad final permite asumir una distribución poissoniana del resultado.

La medición del U/Th en pequeñas cantidades de carbonato pedogénico que se acumula en los cantos de los materiales aluviales permite obtener una edad mínima de la unidad muestreada. En el Centro de Geocronología de Berkley, se analizaron dos muestras de la misma unidad (D), para las que se obtuvo una edad media. El análisis del conjunto de muestras adquiridas por métodos independientes permite estimar en 3-4,5 ka el tiempo transcurrido entre el depósito del material y la formación del suelo (Ferrater et al., aceptado).

A partir de fragmentos de una muestra de carbón (Laboratorio LMC14-Paris) y de un caracol (Laboratorio San Diego State Uni.), se pudieron obtener las edades de ^{14}C , de dos unidades (I, G). Estas edades son consideradas como deposicionales debido a la fragilidad de las muestras, que no sugiere que sean retrabajadas, y ante la ausencia de indicadores de percolación desde estratos superiores o rejuvenecimiento.

De manera adicional, se corroboró la robustez de las edades mediante su comparación con las edades de termoluminiscencia y ^{14}C publicadas por Martínez-Díaz et al (2003), Masana et al. (2004). Éstas últimas han de considerarse edades máximas, ya que se obtuvieron a partir de muestras multi-grano que tienden a dar mayores edades debido a la imposibilidad de detectar granos en los que parte de la luminiscencia es heredada.

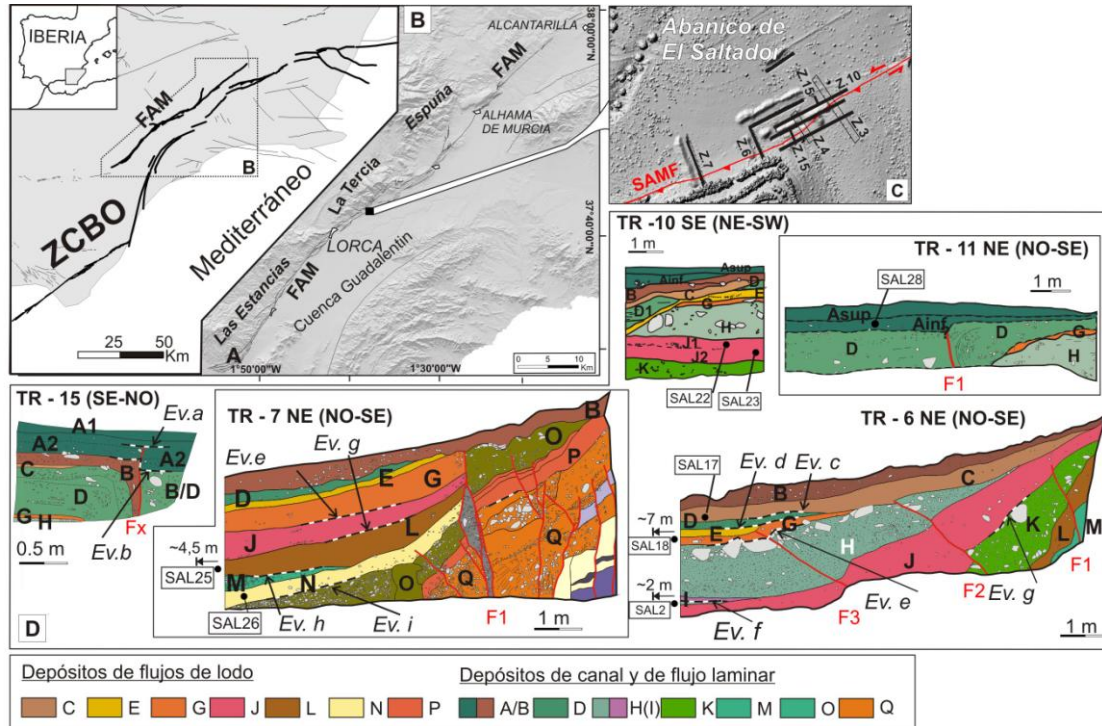


FIGURA 1. A) Zona de Cizalla de las Béticas Orientales (EBSZ); fallas que la conforman en negrita; B) Localización del área de estudio en el mapa estructural y principales accidentes geográficos asociados a la falla de Alhama de Murcia; C) Localización de las zanjas estudiadas en el Saltador; D) Logs de las zanjas 15, 7 y 16 en los que se han identificado las unidades afectadas por las rupturas recientes en la FAMS.

CRONOLOGÍA DE PALEO-TERREMOTOS

Una vez acotado el intervalo temporal de ocurrencia de cada ruptura superficial (interpretadas como PTT), se usó el programa OxCal en su versión 4.2 para construir un modelo de edad mediante el análisis estadístico bayesiano de la secuencia estratigráfica en la que se distinguen los PTT. Para ello, se siguió el procedimiento propuesto por Lienkaemper and Bronk Ramsey (2009) para la obtención de cronologías paleosísmicas y las recurrencias entre eventos. Mediante cálculos iterativos, OxCal permite re-definir las edades más probables de las muestras (edades modeladas) cuando éstas se encuentran en una secuencia deposicional con orden estratigráfico conocido. El programa también calcula las edades de eventos entre dos unidades datadas y los periodos de recurrencia entre eventos sucesivos y recurrencia media de un grupo de eventos (Fig. 2). La Tabla 1 recoge las edades de los eventos (menos el más antiguo que no se ha modelado) si se calculan sólo teniendo en cuenta las edades no modeladas (valor a la izquierda) y las calculadas con OxCal a partir de las probabilidades recalculadas (valor a la derecha del evento). La figura 2 muestra el tipo de gráficas proporcionadas por el programa OxCal, en el ejemplo, para la parte más reciente de la secuencia paleosísmica estudiada.

Además de las edades numéricas, se ha incorporado al modelo una edad histórica, el año 1700 AD. Se ha considerado este año para poder incluir en el resultado que da OxCal para el evento más joven, el último sismo de intensidad suficiente como para poder ser

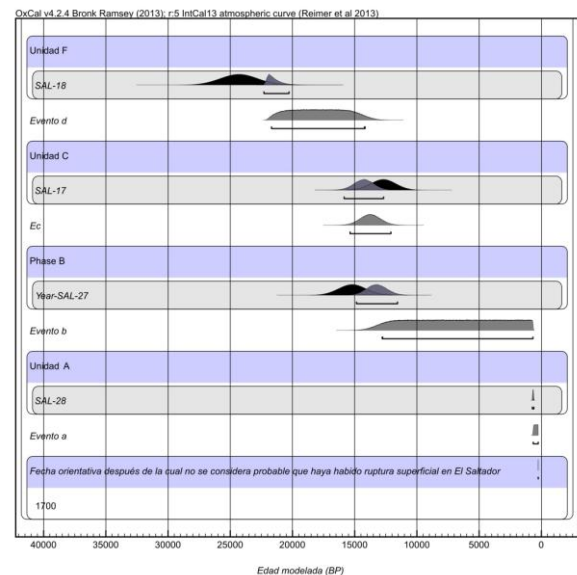


FIGURA 2. Modelo bayesiano obtenido con OxCal v.4.2 para la secuencia de PTT identificada en El Saltador. Edades medidas (en negro) y modeladas (en gris oscuro). Sólo se muestra la parte más reciente de la secuencia de capas/eventos.

relacionado con una ruptura superficial: el sismo de Lorca de 1674 AD (I = VIII). Aún no sabiendo si ese sismo fue o no morfogenético, creemos que tras ese evento, la completitud del catálogo histórico es fiable y permite descartar que sismos posteriores ocurridos en la localidad hayan deformado la superficie. Este dato podría ser congruente con la edad del último sismo, datada en trabajos anteriores (Masana et al. 2004)

como poco tiempo anterior a 1650 AD, teniendo en cuenta que se deriva de una muestra de edad 1550 ± 100 con una incertidumbre de 26.

DISCUSIÓN

La integración de diferentes métodos independientes permite valorar la robustez de una edad (*cross-checking*). Una vez acotado el intervalo de tiempo en el que ha sucedido un paleo-terremoto, éste puede ser reducido mediante la determinación del intervalo más probable de ocurrencia.

Unidad	Muestra	Edad (ka BP)	Método
Evento a (Previo al 1700 A.D.)		0,65-0,25 ka	
A	SAL-28	$0,66 \pm 0,03$	OSL-2
Evento b		12,80-0,675 ka	
B	SAL-27	$15,20 \pm 1,10$	pIRIR
Evento c		15,37-12,09 ka	
C	SAL-17	$12,7 \pm 1$	OSL-1
Evento d		21,69-14,17 ka	
D	SALT 31-5	$12,22 \pm 0,80^*$	U-series
F	SAL-18	$24,3 \pm 1,5$	OSL-1
G	SAL-20	$21,93 \pm 1,09^{**}$	14C
Evento e		25,49 - 22,13 ka	
I	SAL-2	$25,53 \pm 0,30^{**}$	14C BP
Evento f		29,68-25,30 ka	
Jsup	SAL-22	$22,5 \pm 4,1$	pIRIR
Jinf	SAL-23	$30,6 \pm 5,2$	pIRIR
Evento g		42,79-28,20 ka	
L	SAL-25	$41,7 \pm 6,9$	pIRIR
Evento h		58,84-32,54 ka	
N	SAL-26	$54,3 \pm 9,1$	pIRIR
* edad no incluida en el modelado de OxCal por considerarse edad mínima			
** edades calibradas			

TABLA 1. Secuencia de capas afectadas y sus edades según carbono 14 (14C), Series de Uranio (U-series), luminiscencia estimulada ópticamente (OSL-1 uni. de Aarhus; OSL-2, Univ. de Sheffield) y con infra-rojos (pIRIR, Univ. de Sheffield). La incertidumbre es de 26 para edades de 14C y U-series y de 16 para las de luminiscencia. Intercalados en la secuencia se han incluido los paleo-eventos sísmicos y sus edades modeladas en OxCal.

En el caso de estudio, el análisis estadístico realizado ha permitido reducir los rangos de incertidumbre de algunos de los intervalos de tiempo en los que se considera más probable que hayan sucedido los PTT en comparación a los rangos que se derivan del uso directo de las edades máxima y mínima de las capas inferior y superior a un evento. Por ejemplo, antes del análisis estadístico, la edad del evento f se había acotado entre 35,8 ka y 25,23 ka BP por las edades máxima y mínima de las unidades limitantes *J sup* e *I*. La consideración de la edad más

probable teniendo en cuenta la secuencia estratigráfica que se realiza con OxCal da un intervalo de 29,68-25,30 ka para este evento, reduciendo en cerca de 5 ka la incertidumbre del rango de ocurrencia. El tratamiento estadístico de las edades de los PTT también permite observar la gran variabilidad de periodos de recurrencia eventos sucesivos, que en el caso de El Saltador varían entre 0,219 y 16,023 ka (tabla 1), obteniéndose un valor medio de 3,460- y 5,301 ka. Este valor promedio se ha calculado restando las edades de los sismos más joven y más antiguo y dividiendo el resultado entre el número de sismos identificados, en este caso 8.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha financiado con los proyectos SHAKE CGL2011-30005-C02-02, PREVENT CGL2015-66263-R y RISKMAT-2014SGR/1243.

REFERENCIAS

- Ferrater, M., Ortuño, M., Masana, E., Martínez-Díaz, J.J., Pallàs, R., Perea, H., Baize, S., García-Meléndez, E., Echeverría, A., Rockwell, T., Sharp, W.D., Medialdea, A., Rhodes, E. (en revision). Slip-rate estimation combining paleoseismological 3D trenching and morphotectonic cartography: the strike-slip Alhama de Murcia fault (SE Iberian Peninsula). *Quaternary International*
- Ferrater, M., Ortuño, M., Masana, E., Pallàs, R., Perea, H., Baize, S., García-Meléndez, E., Martínez-Díaz, J.J., Echeverría, E., Rockwell, T., Sharp, W. D. (accepted). Refining seismic parameters in low seismicity areas by 3D trenching: the not so slow Alhama de Murcia fault, SE Iberia. *Tectonophysics*.
- Lienkaemper, J. J., and C. Bronk Ramsey (2009). OxCal: Versatile tool for developing paleoearthquake chronologies—A primer, *Seismol. Res. Lett.*, 80 431–434.
- Martínez-Díaz, J.J., Masana, E., Hernández-Enrile, J.L., and Santanach, P., 2003, Effects of repeated paleoearthquakes on the Alhama de Murcia fault (Betic Cordillera, Spain) on the Quaternary evolution of an alluvial fan system: *Annals of Geophysics*, v. 46, no. 5, p. 775–792.
- Masana, E., Martínez-Díaz, J.J., Hernández-Enrile, J.L., y Santanach, P. (2004): The Alhama de Murcia fault (SE Spain), a seismogenic fault in a diffuse plate boundary: Seismotectonic implications for the Ibero-Magrebien region. *Journal of Geophysical Research*, 109: B01301.
- Masana, E., Ortuño, M., Ferrater, M., Perea, H., Baize, S., Echeverría, A., Pallàs, R., García-Meléndez, E., Martínez-Díaz, J.J., Rockwell, T. (2014). Fine grained bodies as evidence of “dusty” paleoearthquakes in the Alhama de Murcia fault geological record. *Extended abstracts de la Segunda Reunión Ibérica sobre fallas activas y paleosismología (Lorca, Murcia)*, 23-26.