



Luminiscencia Ópticamente Estimulada aplicada a sedimentos fluviales: Un enfoque basado en la interpretación de las señales luminosas

Esperanza Muñoz-Salinas^{1,*}, Miguel Castillo-Rodríguez¹

¹ Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510, D.F., México.

* emsalinas@geologia.unam.mx

Resumen

Los depósitos fluviales acarrean granos minerales los cuales están expuestos, en mayor o menor medida, a la luz solar durante su desplazamiento dentro de la columna de agua que los transporta. En geomorfología, se utiliza el método de Luminiscencia Ópticamente Estimulada (OSL, por sus siglas en inglés) para obtener la edad absoluta de aquellos sedimentos que, previos a su deposición, han sido expuestos completamente a la luz solar. Un nuevo enfoque en la OSL se centra en estudiar las señales de luminiscencia en sedimentos para obtener información sobre los mecanismos de transporte que los generaron sin importar que los granos estuvieran totalmente expuestos a la luz solar antes de su deposición. El objetivo de este artículo es proporcionar dos estudios de caso en los cuales se utilizan las señales de luminiscencia siguiendo el nuevo enfoque de la OSL con la finalidad de ejemplificar cómo se usan las señales de luminiscencia para explicar los mecanismos de transporte de sedimento. Las áreas de estudio se localizan en la Sierra de Gredos (España) y en la presa Cadder (Escocia) donde se analizan los depósitos de flujos de derrubios y los depósitos fluviales, respectivamente. Los patrones de luminiscencia obtenidos en la Sierra de Gredos permitieron distinguir los sedimentos de origen fluvial con respecto a los de flujos de derrubios. En el caso de la presa de Cadder, se detectó que los distintos tamaños de grano son inversamente proporcionales a las señales de luminiscencia. Este nuevo enfoque en el uso de la OSL se propone como una herramienta útil en geomorfología para estudiar los mecanismos de transporte de sedimentos mediante el estudio de los depósitos fluviales.

Palabras clave: Depósitos fluviales, transporte de sedimento, OSL, señales de luminiscencia, Sierra de Gredos, Cadder.

Abstract

Fluvial deposits contain mineral grains that are exposed to solar radiation during their transport in the water column. Traditionally, the Optically Stimulated Luminescence (OSL) method has been used in geomorphology to date sediments that have been exposed to sunlight prior to their deposition. A new approach of OSL consists in using luminescence signals of sediments to unravel the mechanisms controlling sediment transport, regardless of whether or not the grains were fully exposed to sunlight before deposition. The main goal of this paper is to exemplify with two case studies on the use of luminescence signals to unravel how sediments are transported in two geomorphic domains. We studied the Sierra de Gredos (Spain) and the Cadder dam (Scotland) where we analyzed debris flow and fluvial deposits respectively. The luminescence signals in Sierra de Gredos allowed us to distinguish fluvial sediments from debris flow deposits. In Cadder we observed an inverse relation between grain size and the intensity of luminescence. We propose that the new approach of OSL in geomorphology is a useful tool in understanding the mechanisms of sediment transport in the study of fluvial sediments.

Keywords: Fluvial deposits, sediment transport, OSL, luminescence signals, Sierra de Gredos, Cadder.

1. Introducción

El estudio de la luminiscencia en minerales tras su estimulación óptica para datación absoluta se propuso por Huntley *et al.* (1985). A partir de ese momento, la técnica de Luminiscencia Ópticamente Estimulada (OSL, por sus siglas en inglés), se ha aplicado con buenos resultados en la datación de distintos tipos de sedimentos, aunque principalmente se ha utilizado en aquellos de origen eólico, fluvial y fluvio-glacial (Sanderson *et al.*, 2007; Pope *et al.*, 2008; Mahan *et al.*, 2009).

Un ejemplo de la aplicación de la OSL para datación absoluta es el estudio de Roberts *et al.* (1997). En este trabajo se fechaban los nidos que quedaron fosilizados y que fueron construidos por las avispas, para obtener una cronología de las pinturas rupestres que se localizan en las cavernas de la región de Kimberley, en el oeste de Australia. Otro ejemplo es el trabajo de Bishop *et al.* (2004), en el cual se datan con la OSL los sedimentos fluviales localizados en distintas secciones verticales excavadas a lo largo de un canal que fue construido por la civilización Khmer para transportar agua desde el río Mekong hasta la antigua ciudad de Angkor Borei, en el sur de Camboya. Otro uso de la OSL fue hecho por Huntley y Clague (1996) quienes fechaban con la OSL los depósitos de tsunamis localizados en la bahía de Cultus, la cual se localiza en el estado de Washington, en los EEUU.

La interpretación de las señales de luminiscencia en sedimentos, sin proceder a su datación, ha sido propuesta más recientemente (Sanderson y Murphy, 2010; Muñoz-Salinas *et al.*, 2011; Munyikwa *et al.*, 2012) y se ha puesto de manifiesto que el uso de dichas señales es una herramienta útil en el estudio de sedimentos fluviales para dilucidar los mecanismos de transporte de sedimentos (Muñoz-Salinas *et al.*, 2011). Ejemplo del uso de este enfoque es el trabajo de Sanderson y Murphy (2010), en el cual se analizan las señales luminosas que provienen de muestras de sedimento extraídas de un perfil vertical que corta los depósitos de un enclave arqueológico en Petrilli, en la región de la Puglia, Italia. En este trabajo, las señales luminosas muestran una diferencia de magnitud entre las muestras de sedimento tomadas en la parte media basal del perfil, las cuales son muy inferiores, con respecto a las que se localizan en la parte media del techo del mismo perfil. La diferencia de magnitud en la luminiscencia se relacionó con la procedencia del sedimento que llegó al enclave arqueológico. Así, se interpretó que el sedimento localizado en la parte basal del perfil, que corresponde con el periodo de ocupación humana en el sitio durante el Neolítico, fue de origen fluvial. En la parte superior del perfil, que corresponde con una edad reciente, el sedimento tuvo su origen en un deslizamiento de los materiales de una terraza situada a una elevación mayor a la de la localización del perfil.

Muñoz-Salinas *et al.* (2012) estudiaron la luminiscencia en dos depósitos de lahares ocurridos en el volcán Popocatepetl (México) en los años 1997 y 2001. De estos

eventos se extrajeron muestras para realizar el análisis de luminiscencia en distintos tramos del recorrido de estos flujos. Los autores observaron cómo la luminiscencia está correlacionada con la pendiente del canal, lo cual se relacionó con un proceso erosivo en los sectores de mayor pendiente y de inmediata incorporación del material enterrado en las paredes del canal, el cual era depositado aguas abajo del punto de erosión donde disminuía la pendiente.

El objetivo de esta investigación es demostrar la utilidad que tienen las señales de luminiscencia en el estudio de los procesos fluviales. Se presentan aquí dos estudios de caso en los cuales se utilizan las señales de la OSL para detectar los distintos mecanismos de transporte de sedimentos. Para cumplir nuestro objetivo seleccionamos dos sitios localizados bajo distintos dominios geomorfológicos. Nuestro primer caso de estudio se encuentra en un valle de la Sierra de Gredos (España), el cual se conoce como la Garganta de Vega, donde los procesos de deglaciación produjeron la acumulación masiva de sedimentos en el fondo del valle. El segundo caso de estudio se llevó a cabo en Cadder (Escocia) donde se analizó la secuencia de deposición de sedimentos atrapados en una presa pequeña y que se encuentran incididos tras la ruptura del muro.

2. Bases teóricas del uso de la Luminiscencia Óptica Estimulada en sedimentos

Los principios básicos de la OSL se basan en la existencia omnipresente de una radiación natural que tiene lugar en los suelos debido a la acción de los isótopos radiactivos ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th y ^{40}K , así como la acción ionizante de partículas subatómicas de gran energía que provienen de los rayos cósmicos y que pueden penetrar hasta cierta profundidad en los suelos (Prescott y Hutton, 1994; Molodkov, 2007). La radiación ionizante permite que, dentro de las estructuras cristalinas de los granos minerales, los electrones que se localizan dentro de la banda de valencia se movilicen a la banda de conducción. Es entre la banda de conducción y la de valencia, en el *gap* de energía, donde los electrones quedan atrapados en imperfecciones de la estructura cristalina del mineral, los cuales se conocen como *traps* o trampas (Huntley *et al.*, 1985). Algunas de las trampas se consideran muy estables por permitir el almacenamiento de electrones durante largos periodos de tiempo. Es importante mencionar que cuanto mayor sea el periodo de exposición a la radiación ionizante por parte del grano mineral, mayor será el número de electrones que quedará almacenado en las trampas. La cantidad de radiación ionizante en los suelos depende de dos factores importantes: La proporción de los isótopos radiactivos existentes en el suelo y el tiempo de exposición (Aitken, 1995).

Cuando el grano mineral es expuesto a la luz solar, la radiación electromagnética hace posible que los electrones almacenados en posiciones energéticas dentro de las

trampas se recombinen en localidades de menor energía. Este mecanismo hace posible que algunos electrones alcancen centros lumínicos. Así, para compensar la pérdida energética, se emiten fotones, los cuales conforman las señales luminosas que provienen de los sedimentos (Aitken, 1995). Si un grano no es expuesto a la luz solar en todas sus caras por un tiempo suficiente durante su transporte, éste mantendrá una cierta cantidad de electrones en las trampas y entonces, el grano no estará totalmente reseteado, es decir que el grano tendrá luminiscencia inherente una vez que ha sido depositado y enterrado. Una vez depositados los granos, éstos comenzarán a almacenar más electrones y, si éstos son estimulados ópticamente en el laboratorio, se detectará una luminiscencia residual previa al último enterramiento, lo cual genera una sobreestimación de la edad del depósito cuando se realiza datación con la OSL (Duller, 2008). No obstante que la sobrestimación en las edades por los procesos descritos se evitan cuando se usa la OSL en la datación de sedimentos, dicho exceso de luminiscencia en una muestra puede proporcionar información sobre los mecanismos de transporte de los granos minerales, en particular, cuando el transporte de sedimentos ocurre de forma rápida (Muñoz-Salinas *et al.*, 2012).

En datación con la OSL, la luminiscencia de los granos minerales debe relacionarse con la irradiación ionizante imperante en el depósito del cual se extrajo la muestra. La radiación se calcula con espectrometría de rayos alfa, beta y gamma, con la cual se estima la dosis de radiación anual. Para calcular la luminiscencia que se obtendrá cada año en la muestra, se pueden realizar varios procedimientos que consisten en irradiar artificialmente y en dosis controladas, la muestra para la estimulación óptica, bien, antes de obtener la luminiscencia natural, el cual se conoce como método aditivo (Aitken, 1998), o bien, después, como es el método regenerativo (Murray y Wintle, 2000). Para ello, se utilizan equipos en los que se pueden introducir varias muestras de sedimento, que consisten en varios granos minerales por cada disco de lectura conocidos como alícuotas (Botter-Jensen, 1977). También en algunos instrumentos se pueden introducir granos individuales (Wu *et al.*, 2010). En todos estos casos los granos minerales requieren un tratamiento químico que consiste en la preparación con ácidos y una separación mecánica basada en la selección de tamaño de grano.

Para usar la luminiscencia en sedimentos, no se calcula la radiación del depósito ni se irradian las muestras para su estimulación óptica, ya que la finalidad no es la datación del depósito *per se*. En este caso, el objetivo es extraer la luminiscencia de distintos granos minerales de un mismo depósito. La estimulación óptica se realiza en la banda del espectro electromagnético del infrarrojo y del azul. Con el primero se estimulan principalmente los feldespatos y con el segundo el cuarzo (Aitken, 1998). Ambos minerales presentan distinto patrón en la estructura mineral, lo cual favorece que los electrones se alojen en distintos tipos de trampas. Los electrones se estimulan en distintas longitudes

de onda del espectro electromagnético, y en caso del uso de la termoluminiscencia, a distintas temperaturas. De esta manera, el patrón de la luminiscencia resultante, el cual se representa en gráficos donde la luminiscencia se relaciona con el tiempo de estimulación y que se conoce como curvas de brillo, son distintas para los minerales de cuarzo y feldespatos. En el caso del cuarzo, las curvas de brillo están bien definidas con un solo pico y para el caso del feldespato, con distintos picos (Huntley *et al.*, 1991; Aitken, 1998).

3. Zonas de estudio.

El primer sitio de estudio se localiza en la Garganta de Vega, la cual se encuentra dentro de la Sierra de Gredos que forma parte a su vez de la cordillera que conforma el Sistema Central que se localiza en la zona centro de España (Figura 1). En la Sierra de Gredos, el último avance glaciario tuvo lugar hace ~26 ka. El retroceso de las masas glaciales comenzó ~21 ka de acuerdo con los resultados de Palacios *et al.* (2011) quienes utilizaron la datación con isótopos cosmogénicos en morrenas laterales y en el lecho de la Garganta de Gredos. Durante el deshielo de los valles de la Sierra de Gredos se liberaron grandes cantidades de agua y sedimento. La alta descarga generada en los ríos facilitó la movilización de grandes cantidades de material inconsolidado localizado sobre las morrenas y en los depósitos de ladera.

En la Sierra de Gredos se generaron flujos de derrubios que en algunos casos llegaron a formar depósitos de hasta 1 a 4 m de espesor, compuestos por clastos de gran tamaño (mayores a 1 m en algunas ocasiones) soportados por una matriz de sedimento más fino y arcilloso. Después de la deglaciación de los valles, el transporte de sedimentos en el valle se debió a la escorrentía por eventos torrenciales. En la Sierra de Gredos, la rápida movilización de los materiales está favorecida por las escasas, pero intensas, precipitaciones estacionales que son típicas de los ambientes mediterráneos (Palacios *et al.*, 2011). En el valle de Vega, se observan depósitos de tipo aluvial en la parte media del valle, a lo largo de lo que debió ser, un represamiento natural del curso del río debido a los cambios de gradiente que forman escalonamientos en el lecho del canal.

En el valle de Vega se tomaron dos perfiles, uno de ellos contiene depósitos de flujos de derrubio y aluviales (VEGA 3; N40°16'4.02", W5°35'39.32") y el otro sólo contiene depósitos aluviales (VEGA 4; N40°16'5.50", W5°35'25.08"). En los flujos de derrubios, los granos se movilizan en un flujo saturado de materiales en carga con una columna de agua turbia que no permite la completa exposición de los clastos a la luz solar durante su transporte y, por tanto, no existe una completa remoción de electrones desde sus posiciones energéticas o trampas. Por el contrario, en el caso de los materiales aluviales, el transporte es en un flujo diluido que favorece la penetración de los rayos

solares sobre los granos minerales en carga a través de la columna de agua.

En el segundo caso de estudio se investigaron los depósitos acumulados en la presa de Cadder. La presa está localizada en el condado de East Dunbartonshire, en Escocia, a 7 km de distancia de la ciudad de Glasgow y a menos de 0.1 km del canal del Forth y Clyde. El canal conecta las tierras bajas de Escocia desde el este, cerca de Edimburgo (Firth of Forth), hasta el oeste, cerca de Glasgow (Firth of Clyde). Las coordenadas de referencia para la localización de esta presa son NS6172, según el sistema de retículas británico (*National Grid Ordnance Survey*). La presa fue construida probablemente entre los siglos XVII y XVIII para represar las corrientes del arroyo de Bishopbriggs con la finalidad de almacenar y encauzar el flujo constante de agua hacia un molino hidráulico (Cawder mill house) que se localiza a unos 100 m de la presa (Figura 2). La construcción de este tipo de molinos y de presas eran frecuentes en Gran Bretaña y su uso tenía distintas aplicaciones como las industriales para la molienda de cereales o como aserraderos de madera, entre otros (Reynolds, 1983). La cantidad de molinos construidos fue tan alta que pueden contabilizarse hasta 1050 localidades en Escocia con molinos y hasta 1662 lugares en Inglaterra donde la toponimia integra la palabra ‘molino’ en inglés o en gaélico (*i.e.* mill, miln o milton). A principios del siglo XIX, con la revolución industrial, la gran mayoría de los molinos de agua cayeron en desuso y los muros de contención de las presas están parcialmente desmantelados debido a su falta de conservación (Gauldie, 1981). Tal es el caso de la presa de Cadder, que debido a la ruptura del muro de contención, el río genera una incisión sobre los depósitos que quedaron atrapados cuando la presa estaba en funcionamiento. Sobre los escarpes de sedimento donde el río ha incidido, se seleccionó un perfil (Figura 3) con la finalidad de investigar el patrón de luminiscencia en profundidad y con distintos tamaños de grano dentro de las fracciones de arena y arcilla. Los depósitos en la presa Cadder son de tipo aluvial y los granos debieron desplazarse en una columna de agua transparente, lo que permitió la penetración de la luz y, con ella, el reseteo de los granos minerales previo a su deposición.

4. Metodología

La metodología que se aplicó para la recolección de las muestras en campo siguió los protocolos propuestos por Muñoz-Salinas *et al.* (2011). El protocolo conlleva la cobertura del perfil en trabajo de campo con una tela oscura para proceder a la limpieza del material superficial en el afloramiento y así remover todos aquellos granos expuestos a la luz solar. El segundo paso consiste en el muestreo, para lo cual se extrae sedimento a distintas profundidades con bolsas o tubos de plástico, que se protegen de la luz solar durante su almacenamiento y traslado al laboratorio. Las muestras se estimularon utilizando un lector portable de OSL

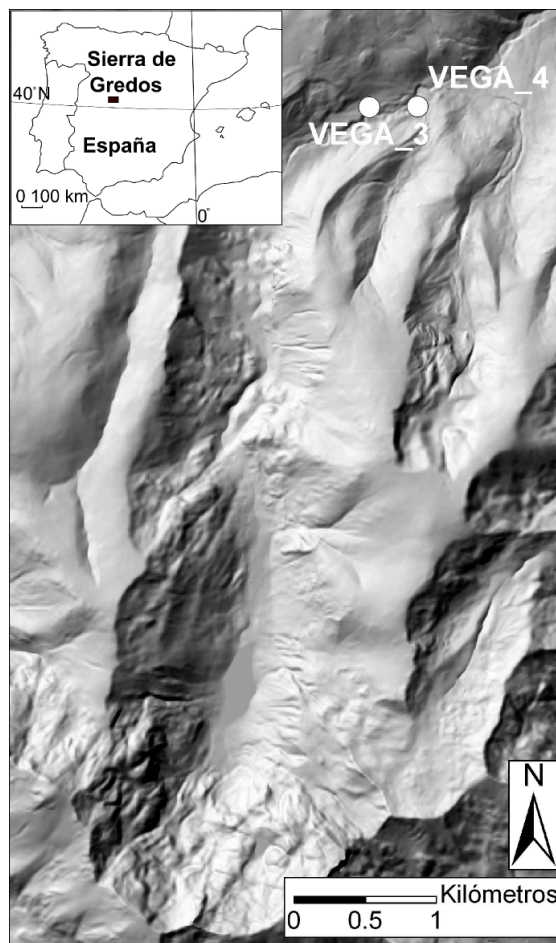


Figura 1. Localización de la Garganta de Vega en la Sierra de Gredos (España). Los perfiles VEGA 3 y VEGA 4 se localizan en la parte baja del valle.

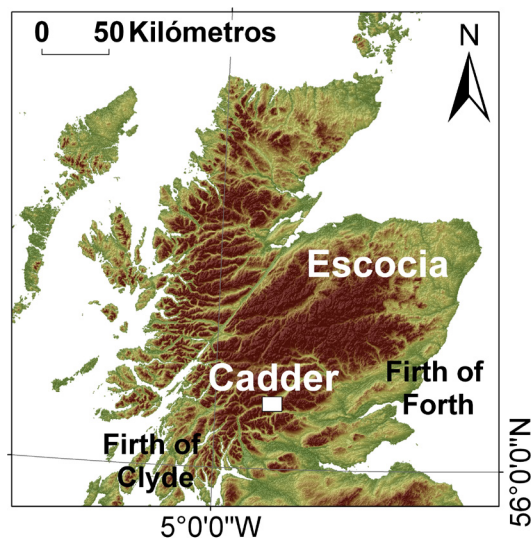


Figura 2. Localización de la presa de Cadder en Escocia. Actualmente la presa no está en actividad y el muro de contención está roto, lo que facilitó que las aguas del río Bishopbriggs incidiesen sobre los sedimentos acumulados en la presa. Sobre los escarpes que se observan a lo largo de la incisión del río, se localiza el perfil de extracción de las muestras tomadas para este estudio (ver Figura 3).

diseñado en el Centro de Investigaciones Medioambientales de las Universidades Escocesas (para más información sobre el instrumento consultar los trabajos de Sanderson y Murphy, 2010 y Muñoz-Salinas *et al.*, 2012).

En el caso de las muestras tomadas en los dos perfiles que se localizan en el valle de Vega, se obtuvieron las muestras en tubos de ~3 cm de longitud y ~1.5 cm de diámetro con un espaciamiento vertical de entre 30 a 40 cm de profundidad. El sedimento extraído se utilizó para la interpretación de las señales luminosas. En el perfil que se localiza sobre los depósitos del flujo de derrubios, además de las muestras de luminiscencia, se extrajo material para proceder a la datación con la OSL. Para la extracción del sedimento se utilizó un tubo de ~25 cm de longitud y ~10 cm de diámetro, el cual se empleó para obtener la luminiscencia del material según los protocolos de Murray y Wintle (2000). Además, en una bolsa se recolectaron ~300 g del sedimento que circundaba al tubo descrito anteriormente, con la finalidad de utilizar este material para estimar la radiación ionizante en el depósito mediante el uso de espectrómetros de rayos beta y gamma en el laboratorio.

En el caso de la presa de Cadder, se tomaron tres muestras de aproximadamente 500 g cada una en bolsas de plástico de color negro, a distintas profundidades (Figura 3).

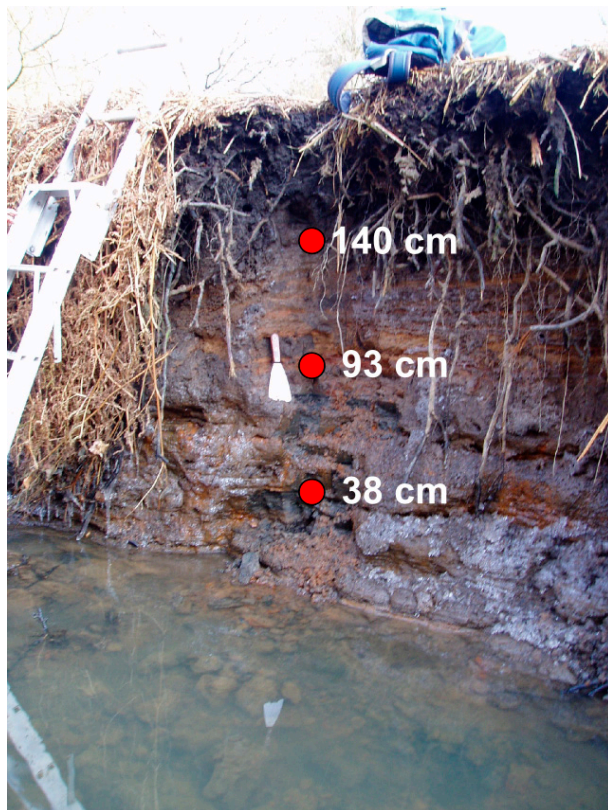


Figura 3. Perfil vertical sobre el afloramiento de los sedimentos acumulados en la presa Cadder. En la figura se indican las elevaciones sobre la base del perfil donde se extrajo el sedimento en bolsas de ~500 g de sedimento para realizar los análisis de luminiscencia en material sin preparación y después de seleccionar distintos tamaños de grano.

Para cada muestra, se tomó una alícuota de ~2 gramos de material para analizar la luminiscencia como se hizo para el caso de Vega. El resto del material, se tamizó bajo luz roja en el laboratorio utilizando los siguientes tamaños de partículas: >2 mm, 2-1, 1-0.5 mm, 0.5-0.250 mm, 0.250-0.125 mm y <0.125 mm, para extraer la luminiscencia según el tamaño del grano.

Los análisis de luminiscencia en el sedimento se realizaron en el Departamento de Ciencias Geográficas y de la Tierra, en la Universidad de Glasgow, Escocia. La estimulación se realizó en el espectro electromagnético del azul y en el del infrarrojo. Los análisis para la datación de la muestra extraída del depósito de flujo de derrubios en el valle de Vega se llevaron a cabo en el Centro de Investigaciones Medioambientales de las Universidades Escocesas (Scottish Universities Environmental Research Centre, SUERC), también en Escocia. Se aplicó el método regenerativo (*single aliquot regenerative method, SAR-method*) siguiendo los protocolos estandarizados de Murray y Wintle (2000).

5. Resultados

En el caso de estudio de los depósitos de flujo de derrubio y aluviales de la Garganta de Vega (Sierra de Gredos), los resultados de luminiscencia en la estimulación en azul e infrarrojo se presentan en la Figura 4 donde se observa como las señales luminosas tienen un comportamiento similar en la estimulación de ambas longitudes de onda del espectro electromagnético. La correlación de la Figura 4 puede interpretarse como una similar proporción a lo largo de todo el perfil de minerales de cuarzo y de feldespatos. Esto es posible, ya que la litología de la Sierra de Gredos está compuesta en su mayoría de rocas graníticas.

En el patrón de luminiscencia que se obtuvo a partir de las señales que provienen de los depósitos de flujo de derrubio en Sierra de Gredos, se observa que las señales oscilan sin una tendencia clara de incremento o decremento de la luminiscencia desde la base del perfil hacia la superficie. Una misma respuesta en el comportamiento de la luminiscencia ha sido observada en depósitos de flujos de derrubios que provienen de lahares del volcán Popocatepetl ocurridos en 1997 y 2001 (Muñoz-Salinas *et al.*, 2011; 2012). El patrón de señales luminosas tendente a la verticalidad en función de la profundidad, es característico de los flujos de derrubios, el cual puede explicarse por la movilización de un material masivo durante la génesis del flujo que genera depósitos de gran espesor que presentan señales luminosas de muy similar magnitud. El depósito de flujo de derrubios se dató con OSL en 8.1 ± 1.0 ka (SUTL2353; Tabla 1) y podría ser uno de los últimos flujos de derrubios que tuvieron lugar en la barranca durante la etapa final de la deglaciación de la misma, de acuerdo con la cronología propuesta por Palacios *et al.* (2011). El material seleccionado para datación en este depósito, al no estar bien

reseteado, genera un error considerable (de ± 1000 años), sin embargo, la datación con OSL se consideró como la mejor forma de proporcionar una edad en este depósito, ya que no se encontró materia orgánica para usar el método de radiocarbono.

En el caso de las señales de luminiscencia que provienen de los depósitos de tipo aluvial, éstas proporcionan señales de mayor magnitud en la base del depósito y decrecen claramente hacia el techo del perfil muestreado. El comportamiento observado en los depósitos aluviales en Sierra de Gredos está en concordancia con lo esperado y observado en otros depósitos de tipo aluvial (Muñoz-Salinas *et al.*, 2011). La relación entre profundidad y luminiscencia se debe al hecho de que los depósitos aluviales acarrean material que tiende a estar bien reseteado durante el transporte, previo a su deposición. Por otro lado, esta

Tabla 1. Edad del sedimento mediante LOE. La muestra fue sometida a procedimiento estándar para la separación de partículas de cuarzo de tamaño arena y su pureza fue analizada con un microscopio electrónico de barrido. La dosis acumulada (Store dose) se realizó por el método regenerativo (Murray y Wintle, 2000). La dosimetría (Dose Rate) se realizó con espectrometría de rayos beta y de alta resolución de rayos gamma. Se hizo la corrección por contribución de rayos cósmicos (Prescott y Hutton, 1994).

Lab. Id	SUTL2353
Localización	Vega3 – flujo de derrubios
Dose Rate (mGya ⁻¹)	5.18 \pm 0.25
Store Dose (Gy)	42.03 \pm 4.89
Edad (ka)	8.1 \pm 1.0

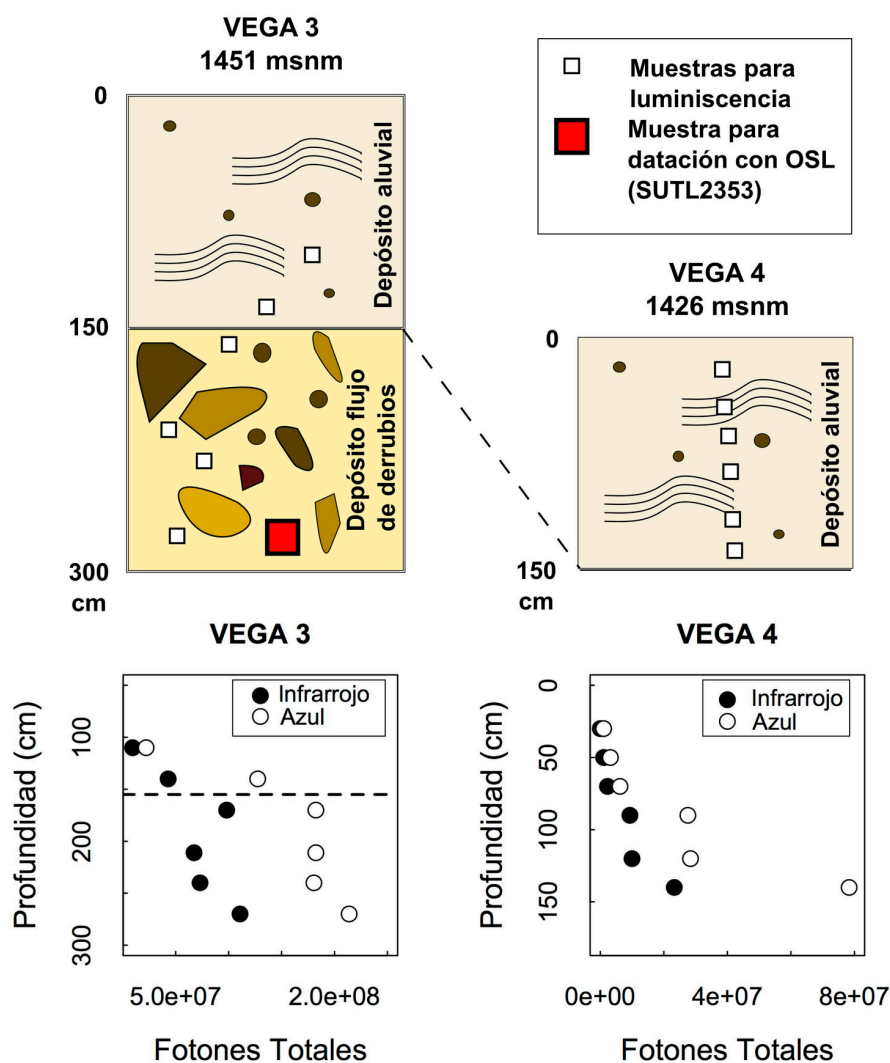


Figura 4. Perfiles de sedimento en VEGA 3 y VEGA 4 donde se extrajeron muestras para luminiscencia (cuadrados de color blanco) y una muestra para datación con OSL (cuadrado de color rojo). Los resultados de luminiscencia muestran como en la base del perfil VEGA 3, donde se localiza el depósito de flujo de derrubios, las señales de luminiscencia tienen una tendencia a la verticalidad según la profundidad. Las señales de luminiscencia en el sedimento de tipo aluvial tienen una marcada tendencia a aumentar con la profundidad (parte superior del perfil VEGA 3 y todo el perfil VEGA 4). La muestra para datación con OSL (SUTL2353 proporcionó una edad para el depósito de flujo de derrubios de 8.1 ± 1.0 ka (ver Tabla 1).

deposición tiene lugar de manera paulatina y no de forma masiva, como ocurre en el caso los flujos de derrubios. Así, los depósitos aluviales pueden rellenar un valle aportando tan sólo algunos milímetros de sedimento por año. Como resultado, la mayor luminiscencia se localiza en la parte basal del depósito, donde se encuentran los sedimentos con mayor tiempo de enterramiento y mayor exposición a la radiación ionizante de los suelos. Las señales luminosas hacia la parte superior del perfil decrecen en depósitos cada vez más recientes.

En el caso de estudio en la presa de Cadder, se observa como la luminiscencia obtenida en las tres muestras que se extrajeron del perfil, sin realizar ningún tipo de separación por tamaño de granos, muestra mayor luminiscencia en la

base del perfil que en el techo (Figura 5). Las observaciones en Cadder guardan, al igual que ocurren con los depósitos fluviales en Sierra de Gredos, concordancia con lo expuesto anteriormente sobre los patrones de luminiscencia bajo una deposición no masiva. Por otro lado, en Cadder se observa como los patrones de luminiscencia obtenidos con la estimulación en azul e infrarrojo guardan una estrecha relación. En Cadder, al igual que en los depósitos fluviales de Sierra de Gredos, existe una distribución de cuarzo y feldespatos que es más o menos proporcionada a lo largo de los depósitos atrapados en la presa, ya que la litología en la cuenca es homogénea.

El análisis de la luminiscencia obtenida de la selección del tamaño del grano (entre 0.5 y 3 μm), indica que los

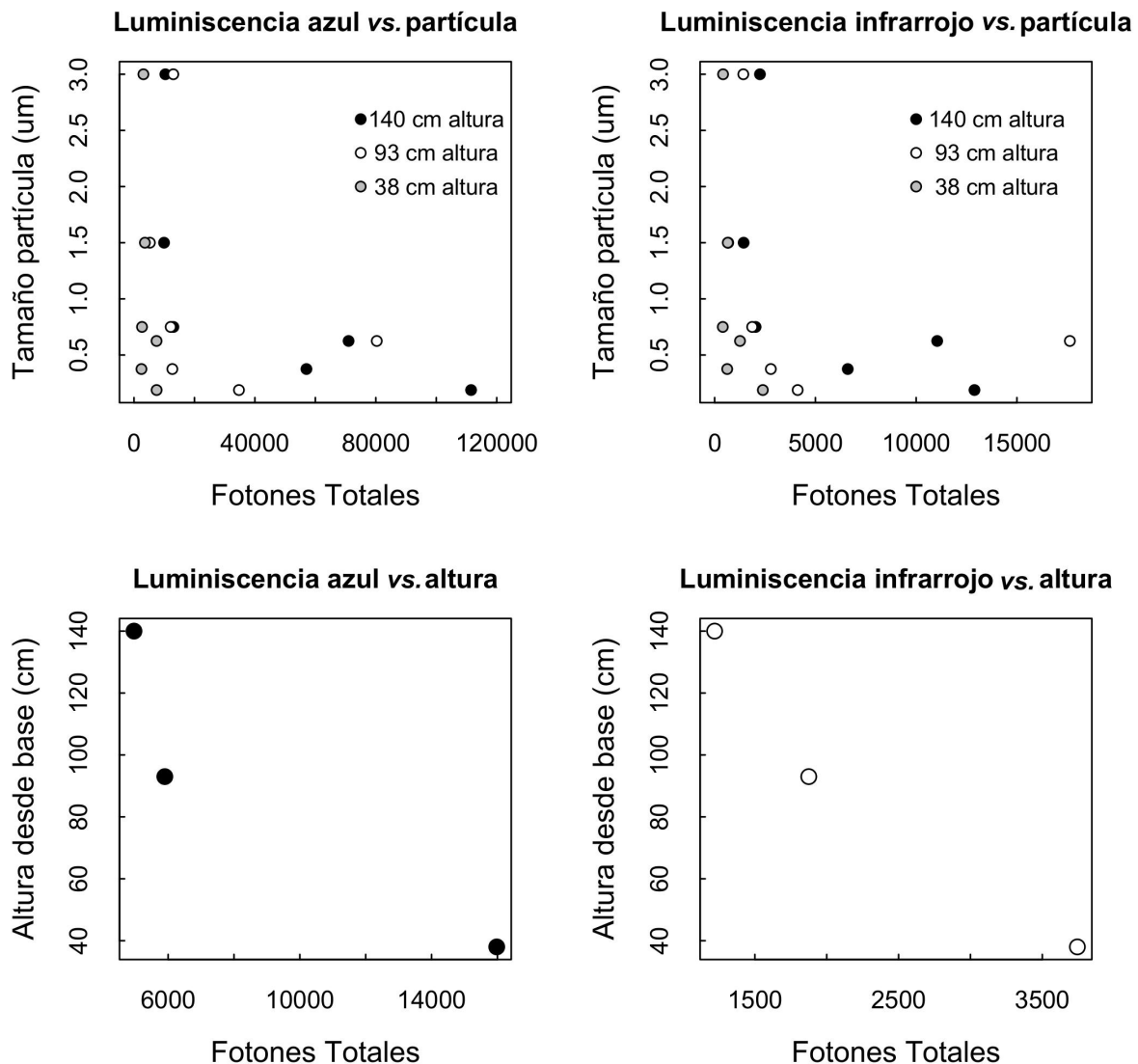


Figura 5. Resultados de luminiscencia en las muestras extraídas del perfil de sedimentos de la presa Cadder. En A y B se muestra la luminiscencia según el tamaño de las partículas. Los valores de luminiscencia son mayores para granos $< 0.5 \mu\text{m}$ en la estimulación con azul e infrarrojo. En C y D, se muestran los valores de luminiscencia sin separación de tamaño de grano desde la base del perfil. Obsérvese como los valores de luminiscencia se incrementan a mayor altura desde la base del perfil. El patrón de luminiscencia que se observa en las gráficas que figuran en C y D sigue el comportamiento teórico de los depósitos compuestos por sedimentos fluviales.

mayores valores de la OSL se registran en los valores más pequeños de partículas (Figura 5). Nuestros resultados son consistentes con otros estudios publicados en donde la luminiscencia varía en función del tamaño del grano mineral. Truelsen y Wallinga (2003) mostraron cómo en depósitos aluviales que procedían de un canal de 300 años en el Río Waal, en Holanda, los granos de menor tamaño ($< 250 \mu\text{m}$) tenían mayor luminiscencia con respecto a los de mayor tamaño. Truelsen y Wallinga (2003) proponen que en depósitos jóvenes puede existir una transferencia térmica que resulta en una recarga de las trampas más energéticas, pero sólo para el caso de los granos de menor tamaño ($< 250 \mu\text{m}$), lo cual hace aumentar artificialmente la luminiscencia.

6. Discusión y conclusiones

La mayor luminiscencia encontrada en los granos de menor tamaño (*i.e.* $0.5 \mu\text{m}$) en los depósitos de la presa de Cadder, concuerda con los resultados de Truelsen y Wallinga (2003) en el canal del Río Waal. Sin embargo, existen otros estudios que relacionan la mayor luminiscencia con los granos de mayor tamaño ($\geq 3 \mu\text{m}$). En estos estudios se propone que durante el transporte de sedimento en un flujo de agua, los granos de mayor tamaño tienden a movilizarse como transporte de carga en las partes bajas de la columna de agua. En esta posición disminuye la probabilidad de que la luz solar pueda alcanzar la superficie del grano que en los sectores más superficiales, donde se moviliza el material fino (*i.e.* tamaño arcilla) en suspensión (Bishop *et al.*, 2011). Por tanto, esta discusión pone de manifiesto que el estudio del tamaño de grano y la luminiscencia es un área abierta a la investigación. Es probable que la luminiscencia y el tamaño de grano cambien en función del régimen de flujo así como la cantidad de transporte de carga que lleva un río.

Los resultados de luminiscencia en los depósitos de origen fluvial en la Garganta de Vega y en la presa de Cadder, muestran como la luminiscencia guarda un patrón característico en relación con los mecanismos que generan el transporte de los materiales. En el caso de los flujos de derrubios, los materiales son movilizados en aguas turbias que impiden el completo reseteo de los mismos, lo que resulta en un patrón de luminiscencia irregular desde el techo a la base del depósito, con una tendencia a la verticalidad. En los depósitos de tipo aluvial, por el contrario, los granos minerales son trasladados en corrientes de agua con poca turbiedad, lo que favorece la penetración de la luz en la columna de agua y produce el reseteo de los granos minerales que son trasladados en carga. En este último caso, el patrón de luminiscencia muestra un notable incremento de los valores en la base del depósito y una progresiva disminución de las señales hacia el techo, donde se localizan los materiales más recientes. Una gran parte de nuestros resultados en Vega y en Cadder están en concordancia con el modelo teórico en la OSL para granos minerales bien expuestos a la luz solar previo a su deposición y enterramiento, en el cual la

luminiscencia aumenta con la profundidad de los depósitos. En contrapartida, el estudio de los depósitos generados por los flujos de derrubios indica que los minerales pueden presentar un distinto tipo de patrón de luminiscencia en el perfil del sedimento. Debido a lo anterior, consideramos que el análisis de la luminiscencia en sedimentos de tipo fluvial, puede aportar información valiosa para entender la dinámica que rige el transporte de sedimentos y dilucidar la evolución de un relieve determinado.

Agradecimientos

El primer autor agradece a la fundación Marie Curie por la beca posdoctoral asignada a la Universidad de Glasgow que permitió la datación de muestras con la OSL. Los autores agradecen al Dr. Paul Bishop por su apoyo en el trabajo de campo en la presa de Cadder y al Dr. David Palacios Estremera por el trabajo de campo realizado en la Sierra de Gredos. Los autores agradecen los comentarios recibidos por parte del Dr. Epifanio Cruz Zaragoza y de un revisor anónimo.

Referencias

- Aitken, M.J., 1998, An introduction to Optical Dating, The Dating of Quaternary Sediments by the Use of Photon-Stimulated Luminescence: New York, USA, Oxford University Press, 267 p.
- Aitken, M.J., 1995, Thermoluminescence dating: past progress and future trends: Nuclear Tracks, 10, 3-6.
- Bishop, P., Sanderson, D., Stark, M., 2004, OSL and radiocarbon dating of a pre-Angkorian canal in the Mekong delta, southern Cambodia: Journal of Archaeological Science, 31, 319-336.
- Bishop, P., Muñoz-Salinas, E., MacKenzie, A.B., Pulford, I., McKibbin, J., 2011, The character, volume and implications of sediment impounded in mill dams in Scotland: the case of the Baldernock mill dam in east Dundarshire: Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 101, 97-110.
- Botter-Jensen, L., 1997, Luminescence techniques: instrumentation and methods: Radiation Measurements, 27, 749-768.
- Duller, G.A., 2008, Single-grain optical dating of Quaternary sediments: why aliquot size matters in luminescence dating: Boreas, 37, 589-612.
- Gauldie, E., 1981, The Scottish Country Miller 1700-1900. A history of water-powered meal milling in Scotland: Edinburgh, UK, John Donald Publishers.
- Huntley, D., Clague, J.J., 1996, Optical dating of Tsunami-Laid sands: Quaternary Research 46, 127-140.
- Huntley, D.J., Godfrey-Smith, D.I., Thewalt, M.L.W., 1985, Optical dating of sediments: Nature, 313, 105-107.
- Mahan, S.A., Noe, D.C., McCalpin, J.P., 2009, Use of OSL dating to establish the stratigraphic framework of Quaternary eolian sediments, Anton scarp upper trench, northeastern Colorado High Plains, USA: Quaternary International, 199, 91-103.
- Molodkov, A., 2007, IR-OSL dating of uranium-rich deposits from the new late Pleistocene section at the Voka site, North-Eastern Estonia: Quaternary Geochronology, 2, 208-215.
- Munyikwa, K., Brown, S., Kitabwalla, Z., 2012, Delineating stratigraphic breaks at the bases of postglacial eolian dunes in central Alberta, Canada using a portable OSL reader: Earth Surface Processes and Landforms, 37, 1603-1614.

- Muñoz-Salinas, E., Bishop, P., Sanderson D., Zamorano, J.J., 2011, Interpreting luminescence data from a portable OSL reader: three case studies in fluvial settings: *Earth Surface Processes and Landforms*, 36, 651-660.
- Muñoz-Salinas, E., Bishop, P., Zamorano J.J., Sanderson, D., 2012, Sedimentological processes in lahars: Insights from optically stimulated luminescence analysis: *Geomorphology*, 136, 106-113.
- Murray, A.S., Wintle, A.G., 2000, Luminescence dating of quartz using and improved single-aliquot regenerative-dose protocol: *Radiation Measurements*, 32, 57-73.
- Palacios, D., Marcos, J., Vazquez-Selem, L., 2011, Last Glacial Maximum and deglaciation of Sierra de Gredos, Central Iberia Peninsula: *Quaternary International*, 233, 16-26.
- Pope, R., Willinson, K., Skovrtsov, E., Triantonphylov, M., Ferrier, G., 2008, Clarifying stages of alluvial fan evolution along the Sfakian piedmont, southern Crete: New evidence from analysis of post-incisive soils and OSL dating: *Geomorphology*, 94, 206-225.
- Prescott, J.R., Hutton, J.T., 1994, Cosmic ray contributions to dose rates for luminescence and ESR dating: large depths and long-term time variations. *Radiation Measurements*, 23, 497-500.
- Reynolds, T.S., 1983, *Stronger than a hundred men. A history of the vertical water Wheel*: Baltimore and London, USA and UK, The Johns Hopkins University Press.
- Roberts, R., Waish, G., Murray, A., Olley, J., Jones, R., Morwood, M., Tuniz, C., Lawson, E., Macphail, M., Bowdery, D., Naumann, I., 1997, Luminescence dating of rock art and past environments using mud-wasp nests in northern Australia: *Nature* 387, 696-699.
- Sanderson, D.C.W, Murphy, S., 2010, Using simple portable OSL measurements and laboratory characterisation to help understand complex and heterogeneous sediment sequences for luminescence dating. *Quaternary Geochronology*, 5, 299-305.
- Sanderson, D.C.W., Bishop, P., Stark, P., Alexander, S., Penny, P., 2007, Luminescence dating of canal sediments from Angkor Borei, Mekong Delta, Southern Cambodia: *Quaternary Geochronology*, 2, 322-329.
- Truelsen, J.L., Wallinga, J., 2003, Zeroing of the OSL signal as a function of grain size: investigating bleaching and thermal transfer for a young fluvial sample: *Geochronometria*, 22, 1-8.
- Wu, T.S., Jaiswal, M.K., Lin, Y.N., Chen, Y.W., Chen, Y.G., 2010, Residual luminescence in modern debris flow deposits from western Taiwan: A single grain approach: *Journal of Asian Earth Sciences*, 38, 274-282.
- Manuscrito recibido: Junio 10, 2013.
- Manuscrito corregido recibido: Julio 31, 2013.
- Manuscrito aceptado: Agosto 22, 2013.