

Geoquímica de elementos mayores aplicada al análisis forense en suelos arcillosos. Estudio de caso y análisis de alcance

Geochemistry of major elements applied to forensic analysis on a clayey soil. Case study and scope analysis

Pedro Luis López Julián^{1,2}, Óscar Pueyo Anchueta^{2,3} y Miryam Al-Fawal Portal²

¹ Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia – C/ Mayor, s/n – 50.100 – La Almunia – pllopez@unizar.es

² Sociedad Europea de Ciencias Forenses – miryamalfawal@secifo.org

³ Dept. Ciencias de la Tierra – Universidad de Zaragoza – C/ Pedro Cerbuna, 12 – 50.009 – Zaragoza – opueyo@unizar.es

ABSTRACT

In this work, a group of samples from clayey soils of the same study area has been analyzed in terms of major elements geochemistry. The study is designed as a usual forensic analysis with the aim of locating a crime and where to evaluate the certainties associated with this type of studies. Usual geological methodologies are evaluated in order to its transposition to judicial affairs. These results have been obtained at optimal conditions of sampling and preparation, and where the use of analytical techniques can be controlled in terms of its geological and edaphological meaning. Results, even when they have been obtained in the same sampling environment, show a wide variability in terms of major elements with variations between 2% and 8%. These ranges agree with the intrinsic variability of the analyzed environment, and within the expected results in a scientific analysis, but they are not at reasonable ranges of accuracy for a judicial subject. This suggests that results presentation requires to be submitted in an appropriate manner at the forensic studies. These data are subsequently analyzed in an inverse manner, to determine that the variability of the results would not allow asserting without doubt a common geographical origin.

Key-words: geochemistry, clayey soil, forensic, natural variability, major elements.

RESUMEN

En este trabajo se aborda el análisis de un grupo de muestras procedentes de suelos arcillosos de una misma parcela de estudio a través del análisis químico de elementos mayores. El estudio se dimensiona como si de un estudio forense se tratara en la ubicación de un delito y se valoran las certidumbres asociadas a este tipo de estudios, comparando con la interpretación habitual en campos de la geología y su trasposición a estudios de índole legal, pericial y judicial. Se valora la precisión alcanzada en condiciones óptimas de muestreo, preparación y uso de técnicas analíticas, y se discute su variabilidad en función del contexto geológico y edafológico. Estos resultados permiten identificar que, aunque todas las muestras proceden de una misma zona geográfica y están muy próximas entre sí, sus contenidos medidos en elementos mayores exhiben variaciones entre el 2% y el 8%, rangos de precisión razonables en estudios científicos descriptivos y para este contexto geológico, pero que deben ser valorados y presentados de forma adecuada en el caso de tratarse de un estudio forense. Estos datos son analizados posteriormente de forma inversa, para establecer que la variabilidad de los resultados no permitiría afirmar taxativamente un origen geográfico común.

Palabras clave: geoquímica, suelo arcilloso, forense, variabilidad natural, elementos mayores.

Geogaceta, 64 (2018), 155-158
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 31 de enero de 2018
Revisión: 9 de abril de 2018
Aceptación: 25 de abril de 2018

Introducción

La caracterización geoquímica es una metodología habitual empleada en el estudio de suelos y sedimentos. Esta disciplina ha avanzado notablemente gracias a la evolución de las técnicas analíticas instrumentales. Un análisis químico, habitual en la investigación geológica o ambiental, suele permitir la determinación de los contenidos en los diversos elementos químicos presentes en una determinada muestra de suelo. A partir de ello y complementando esta información con datos sobre la mineralogía, textura o geomorfología

del emplazamiento, se pueden alcanzar conclusiones relativas a los procesos involucrados en su origen, así como clasificar los materiales de una forma precisa.

Por otra parte, las muestras de suelo (o de sedimentos superficiales) suelen formar parte del conjunto de indicios o pruebas a considerar en el análisis de la escena de un delito (Murray y Tedrow, 1975). En estas circunstancias se acude a las mismas técnicas y metodologías de análisis que en el caso de estudios geológicos tradicionales, pero focalizando el análisis a la presencia de variaciones horizontales y verticales que puedan adscribirse a cambios re-

cientes, y que permitan establecer asociaciones sobre la impronta dejada por la presencia de determinadas personas (en grado de presunción) y en lugares concretos (escena del crimen u otros escenarios intermedios que puedan constituir coartadas; Morgan y Bull, 2007).

En este contexto, la filosofía de interpretación de los resultados cambia radicalmente respecto de lo que sería un estudio científico clásico, tanto por la representatividad de los datos como por los objetivos del análisis a realizar. De igual forma, el desarrollo metodológico es claramente distinto, ya que en un caso forense raramente se tiene la oportunidad de dis-

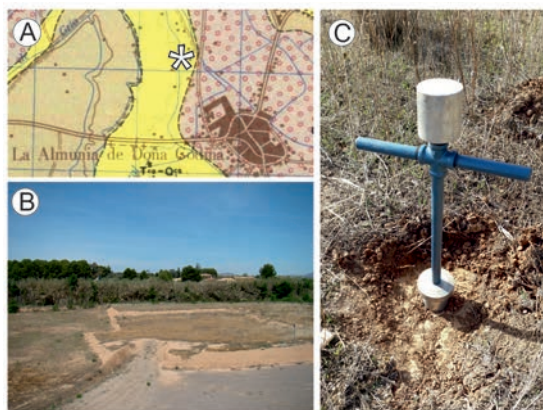


Fig. 1.- A) Localización aproximada sobre el mapa geológico a escala 1:50.000 (modificado de Hernández Samaniego *et al.*, 1980. **B)** Aspecto general de la parcela. **C)** Detalle de la recogida de muestras. Ver figura en color en la web.

Fig. 1.- A) Location on the geological map at 1:50,000 scale of the studied zone (modified from Hernández Samaniego *et al.*, 1980. *B)* View of the sampling area. *C)* Detail of soil sampling device. See color figure in the web.

poner de cantidades importantes de muestra para analizar, lo cual es determinante para escoger la técnica analítica más apropiada para cada caso concreto, o de un número significativo de muestras de control para poder llevar a cabo un análisis geoestadístico adecuado (Marumo, 2002). Además, en el ámbito forense no se busca específicamente llevar a cabo una clasificación descriptiva del material analizado, sino intentar establecer la probabilidad de relación de identidad, de forma suficientemente robusta, con una muestra determinada y otras aparentemente similares, procedentes de localizaciones conocidas (escena y/o escenario) y de interés para el caso concreto, es decir, establecer las diferencias y determinar la certeza del origen de dichos cambios.

Los materiales naturales (rocas, suelos, sedimentos, aguas, etc.) presentan una variabilidad intrínseca en su composición química que depende del área fuente y del medio sedimentario o pedogenético en el que aparecen o en el que se formaron. Sin embargo se pueden establecer relaciones de proximidad genética o espacial entre dos muestras con rangos de con-

centración similares, aunque no sean idénticas. Cuando esta relación se intenta establecer con propósitos forenses, los encargados últimos de considerar y evaluar los datos obtenidos (miembros de tribunales y jurados) no suelen estar familiarizados con esta variabilidad natural, lo que puede desembocar en la elección de variables no independientes, representativas o características para el objetivo del estudio.

En los últimos 15 años, la proliferación de películas y series de televisión ambientadas en el mundo forense han creado una sensación socialmente generalizada de "infalibilidad" de los métodos instrumentales, muchas veces descontextualizadas de su

ambiente natural o geológico. Esta circunstancia se conoce como "efecto CSI", en el que se supedita cualquier tipo de valoración a los datos obtenidos de una técnica analítica sofisticada y en el que, en muchas ocasiones, se confunde la resolución de la medida (próxima al 100%) con la fiabilidad de la representatividad de la muestra analizada (Morgan y Bull, 2007). Todo lo anterior, se deriva seguramente de la popularización de los resultados de las determinaciones de ADN y su uso forense desde los años 90 del siglo XX.

En este sentido, la geoquímica con objetivos forenses debería utilizarse, de forma general, más como criterio excluyente que como identificador. Es decir, los resultados del análisis pueden permitir afirmar que una muestra sometida a análisis no coincide con ninguna de las de control, o que dicho análisis no permite excluir una hipótesis de forma completa. No debe olvidarse que las consecuencias de la interpretación de los resultados suponen aquí argumentos que conllevan responsabilidad jurídica para un presunto autor, por lo que se debe evitar cualquier tipo de especulación o apreciación subjetiva.

En la literatura existente se ha hecho hincapié en las fuentes de variación cuantitativa de los resultados de los análisis sobre muestras de suelos o sedimentos procedentes de un mismo origen (Thornton, 1986). Así, además de la propia variabilidad natural ya comentada, pueden obtenerse distintos resultados analíticos si empleamos diferentes técnicas de análisis, ya que cada una de ellas tiene una precisión diferente para cada elemento analizado, además de que el tratamiento de las muestras previo al análisis también difiere y puede provocar

variaciones en los resultados finales (Croft y Pye, 2004). El procedimiento de recogida de las muestras también puede influir, así como las condiciones de conservación de las mismas, de ahí la importancia del control detallado y pormenorizado de la llamada "cadena de custodia". Finalmente, no hay que olvidar que los muestreos realizados por técnicos suelen ser más cuidadosos y meticulosos que los procesos casuales que generan la acumulación de partículas en zapatos, ropa o elementos inferiores de vehículos (lugares más comunes de procedencia de las muestras sometidas a los análisis forenses). En estos últimos es donde se suele producir una selección granulométrica y, además, puede haber fenómenos de contaminación simple o múltiple.

En este trabajo se aborda el análisis de la variabilidad natural existente en muestras de suelo arcilloso procedentes de un mismo origen conocido, homogeneizando tanto los métodos de muestreo como los analíticos, para así evaluar la variabilidad inherente presente en el área de muestreo y establecer el grado máximo de precisión que se podría alcanzar si se abordase este estudio desde una perspectiva forense. Este tipo de análisis puede permitir establecer una serie de consideraciones sobre la variabilidad natural inherente de un medio sobre el cual se producen modificaciones recientes que son el objetivo del estudio de un análisis forense, y la importancia del contexto geológico e histórico del punto de estudio a la hora de establecer consideraciones sobre la representatividad y variabilidad potencial en un determinado contexto y los indicadores que pueden ser considerados como significativos para obtener conclusiones. En general, las metodologías de análisis geoquímico tienen un campo de aplicabilidad potencial muy amplio en el ámbito forense, debido principalmente al gran desarrollo de las técnicas analíticas que permiten obtener resultados rápidos, muy precisos, a costes relativamente bajos y para un número elevado de elementos analizados.

Materiales y métodos

Para el estudio planteado se ha seleccionado una zona que cumple una serie de requisitos predefinidos y ajustados a los objetivos de la investigación. En primer lugar, tratarse de una zona de acceso restringido, no de paso natural de personas ni de vehículos, para así evitar situaciones de intensa contaminación antrópica que pudiesen interferir en el estado de los materiales analizados. En segundo lugar, que en su superficie exista un material de natura-

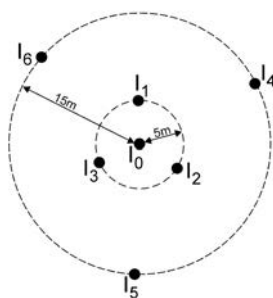


Fig. 2.- Patrón de muestreo aplicado alrededor de la muestra I0.

Fig. 2.- Sampling pattern applied around sample I0.

leza detrítica mayoritariamente fina, que es el que con mayor probabilidad podría quedar adherido a calzado, vestimentas, herramientas o partes inferiores de vehículos. Y en último lugar, que se trate de un tipo de material geológicamente común, para que las conclusiones puedan ser extensivas a un gran número de situaciones reales.

Se seleccionó un terreno situado en la parte posterior de la Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia, con acceso restringido a la circulación habitual de vehículos, con topografía abanacada y en cuya superficie se ha desarrollado un perfil de alteración sobre niveles de arcillas del Mioceno, con vegetación natural escasa y de porte bajo. En la figura 1A se muestra la ubicación geológica aproximada de la zona de estudio, así como el aspecto general de la zona previa a la toma de muestras (fig. 1B).

El muestreo consistió en obtener una muestra inicial (I_0), respecto a la cual se tomaron grupos de 3 muestras a distancias de 5 y 15 m. El muestreo se realizó a través de un tomamuestras cilíndrico que permite recoger volúmenes de suelo a través de su hincia con una maza (Fig. 1C). El muestreo incluyó la retirada de la escasa maleza, para poder facilitar la recogida de suelo superficial; el patrón de toma de muestras se recoge en la figura 2 (coordenadas geográficas del punto central I_0 : $41^{\circ} 28' 50,8''$ N y $01^{\circ} 22' 53,1''$ O).

Las muestras obtenidas fueron desecadas en laboratorio, y separadas las fracciones mediante un tamiz UNE de 2mm de luz de malla. La fracción inferior se sometió a molienda en molino de ágata, y se procedió a su análisis químico mediante ICP-OES (elementos mayores) e ICP-MS (elementos menores y traza) en el Laboratorio de Geocronología y Geoquímica de la Universidad del País Vasco. En el presente trabajo se han considerado los resultados del análisis de elementos mayores (Si, Al, Fe, Ca, Mg, Mn, Na, K y Ti). Las incertidumbres asociadas a la determinación de cada uno de los elementos analizados osciló entre el 1% (óxidos de Si, Ca, Fe, Mg, Mn y Ti) y el 3% (óxidos de Al, K y Na). Estos valores suponen un nivel de confianza del 95%, y son habituales para esta técnica según la literatura (Pye *et al.*, 2006). También se han realizado las determinaciones tanto de los contenidos en H_2O presente en las redes cristalinas, como de materia orgánica y de CO_2 , mediante pérdidas al fuego a 200, 500 y 900 °C. Estos últimos análisis se llevaron a cabo en el Laboratorio de Geoquímica del Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Zaragoza.

El parámetro estadístico escogido para evaluar la variabilidad entre muestras ha sido el coeficiente de variación (CV), calculado como el cociente entre la desviación estándar y la media para cada variable, expresado en porcentaje.

Resultados

Las muestras de suelo recogidas presentaron un aspecto textural y color muy similares, tal y como cabría esperar por su procedencia de un área de extensión limitada y en un medio previsiblemente natural. El color de las muestras por inspección visual tras secado en estufa fue prácticamente idéntico (5YR 6/4, según las tablas Munsell).

La tabla I presenta los resultados del análisis de elementos mayores realizado mediante ICP-OES sobre las 7 muestras recogidas según el patrón indicado en la figura 2. También incluye los contenidos en H_2O en las redes cristalinas, en materia orgánica y en CO_2 , obtenidos mediante el ensayo de pérdidas al fuego.

En la parte inferior de la tabla I se incluyen además los resultados relativos a la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación, parámetros estadísticos obtenidos a partir de los resultados de todas las muestras analizadas para cada elemento considerado. Como observación general a partir de los datos de la tabla I, se comprueba que las muestras ofrecen valores distintos para cada uno de los elementos analizados, como cabría esperar de la propia variación geoquímica natural incluso para muestras procedentes de un mismo tipo de suelo y abarcando un área de extensión reducida. La utilización de un protocolo homogéneo tanto en la recogida de muestras como en su preparación y en el propio análisis (llevado a cabo mediante la misma técnica instrumental y en una misma tanda) permite considerar que las diferencias observadas

deben mayoritariamente a la variación intrínseca natural del medio y a la resolución analítica del método de análisis empleado. Tal y como se observa en la tabla I, los valores del CV se encuentran en la mayoría de los casos por debajo del 5%, superándose sólo este rango para las medidas de Al_2O_3 y de materia orgánica.

En general, los resultados del análisis químico presentan las características esperadas para muestras geológicas de los materiales analizados (zona superficial de un perfil de alteración desarrollado sobre lutitas miocenas, bajo un clima templado continental con lluvias promedio escasas, por debajo de los 400 mm/año). De estos valores se puede establecer que el material cenozoico original aporta la fracción aluminosilicatada, complementada con una fracción carbonatada de neoformación asociada a los procesos edafogénicos. A estos valores se añade la contribución de la materia orgánica de origen vegetal de los suelos desarrollados en la zona analizada. Así, los principales óxidos en las muestras corresponden a SiO_2 y a Al_2O_3 que son los constituyentes mayoritarios de los minerales de la arcilla y del cuarzo presentes en la zona. Del resto, los dos con mayor contribución tras los anteriores son el CaO y CO_2 , que conforman de manera conjunta la fracción carbonatada cálcica de neoformación del suelo (además de la posible contribución de yeso en el caso del CaO).

Los contenidos en SiO_2 y en Al_2O_3 muestran un CV del 4,70 y 8,33 %, respectivamente. Al observar los datos en detalle, se comprueba que la muestra I_1 presenta valores llamativamente bajos para ambos óxidos (un 9% inferior a la media para SiO_2 , y un 16% para Al_2O_3). No obstante, la relación SiO_2/Al_2O_3 oscila entre 3,6 y 4,2, lo que concuerda con los valores promedio para las lutitas y que según Pettijohn (1957) se sitúa en torno a 3,77, por lo que se deduce que ha debido producirse un sesgo puntual en el muestreo que ha hecho disminuir simultánea-

Muestra	SiO_2	Al_2O_3	GaO	Fe_2O_3	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	H ₂ O	MO	CO_2
I_0	45,19	12,32	13,29	3,93	3,07	2,23	0,20	0,56	0,054	2,71	3,48	12,85
I_1	4,17	9,82	13,35	3,81	3,20	2,18	0,19	0,55	0,053	2,90	3,88	12,68
I_2	46,21	11,05	13,10	3,55	3,20	2,17	0,21	0,57	0,054	2,59	3,23	12,71
I_3	46,71	12,38	13,69	3,99	3,08	2,06	0,19	0,58	0,051	2,59	3,33	12,78
I_4	45,51	12,53	13,57	4,08	3,18	2,18	0,20	0,58	0,053	2,80	3,63	12,81
I_5	47,99	12,10	12,93	3,89	2,83	2,16	0,18	0,58	0,054	2,82	3,61	12,11
I_6	46,30	11,51	13,61	3,73	2,89	2,07	0,19	0,56	0,051	2,86	3,93	12,63
Resumen estadístico												
\bar{x}	45,58	11,67	13,36	3,85	3,06	2,15	0,19	0,57	0,05	2,76	3,58	12,65
σ	2,14	0,97	0,28	0,17	0,15	0,06	0,01	0,004	0,001	0,13	0,26	0,25
Cv(%)	4,70	8,33	2,10	4,57	4,90	2,89	5,02	2,13	2,54	4,77	7,27	1,98

Tabla I.- Resultados del análisis de las muestras consideradas, expresados en porcentaje. En la parte inferior de la tabla se presentan los principales resultados del análisis estadístico descriptivo (ver explicación en el texto)

Table I.- Results from the analyzed samples, expressed as a percentage of oxides. The main results of the statistical analysis are also presented at the bottom of the table (see text for explanation).

mente los contenidos en ambos óxidos, pero sin modificar la relación porcentual entre ambos.

Por otro lado, los contenidos en CaO y CO₂ ofrecen una menor variabilidad en el conjunto de las muestras, con valores del CV en torno al 2%, lo que permite determinar que la proporción total de carbonato cálcico es casi idéntica en todas las muestras analizadas.

Los contenidos en óxidos de K y de Na reflejan una variación prácticamente análoga entre sí, con valores del CV en torno al 5% para ambos casos. Se trata de elementos asociados a los procesos formadores del suelo, originalmente presentes en los minerales de la arcilla del material parental. En el caso del Mg el valor del CV es algo inferior al 3%, de manera similar a lo exhibido por el Ti y Mn, que presentan valores del CV de 2,1 y 2,5, respectivamente, mientras que para Fe₂O₃, el CV es de aproximadamente el 5%. En este último caso hay que señalar que se trata de un óxido muy sensible a los procesos de contaminación antrópica (Pye *et al.*, 2006), aunque el valor obtenido no muestra una incidencia significativa en este sentido.

Finalmente, los valores del CV de materia orgánica y H₂O, determinados por pérdidas al fuego, son del 7,2 y del 4,7, respectivamente. Estos valores y su desviación no tienen una interpretación geoquímica clara, ya que dependen en buena medida de la granulometría del depósito, de las precipitaciones recientes y del desarrollo de la cobertera vegetal, que en este caso es muy irregular por razones climáticas y del substrato de la zona. A pesar de ello, los valores de CV no son excesivamente elevados, teniendo en cuenta que la incertidumbre analítica asociada a la determinación por pérdidas al fuego es superior a la empleada para determinar el resto de elementos analizados.

Finalmente, es necesario recordar que las muestras analizadas corresponden a la fracción inferior a 2 mm, es decir, que se ha analizado el conjunto de partículas de tamaño arena e inferiores, excluyendo por tanto los fragmentos de tamaño grava para evitar o minimizar la incidencia del "efecto pepita", que podría haber tenido lugar con mayor facilidad en un análisis de muestra total.

Discusión y Conclusiones

Los resultados obtenidos del análisis geoquímico de los suelos ha permitido comprobar que, en la zona de estudio, aplicando una recogida homogénea de muestras (tratamiento granulométrico; fracción inferior a 2 mm) y a partir de la metodología instrumental de análisis,

el margen de precisión alcanzable al comparar los contenidos en elementos mayores está en torno al 2% para los óxidos de Ca, Ti y Mn, al 3% para el MgO, alrededor del 5% para los óxidos de Si, Fe, K y Na, y aproximadamente del 8% para el Al₂O₃.

En un estudio geoquímico realizado con objetivos descriptivos edafológicos o ambientales, estos valores numéricos serían perfectamente aceptables para llevar a cabo la caracterización y clasificación del nivel edáfico analizado, máxime si tenemos en cuenta que sólo los márgenes de incertidumbre de la técnica analítica empleada oscilan entre el 1 y el 3% para los elementos considerados. Sin embargo, la aplicación de la metodología planteada a un estudio forense debe partir de la consideración del rango de variación natural previamente presente en el medio de estudio. Los resultados analíticos obtenidos no permitirían afirmar taxativamente y sin ningún género de duda que las muestras analizadas proceden del mismo lugar o, de forma contraria, aseverar (por ejemplo) que la muestra I₀ tenga su origen en la misma zona donde se tomaron todas las demás muestras, a pesar de que existen claros argumentos geoquímicos y edafológicos que permiten explicar razonadamente las variaciones cuantitativas observadas en un medio de control como el analizado.

En el caso de un estudio con finalidad forense, este tipo de situaciones debe tratarse no desde una perspectiva de compatibilidad, sino con una finalidad incluyente o excluyente. En este caso concreto, suponiendo por ejemplo que la muestra I₀ tiene un origen desconocido y se realizara el análisis comparado de sus resultados analíticos con los de las muestras indubitadas analizadas (I₁ a I₆), la conclusión más adecuada sería que "no se puede excluir un origen común para todas ellas". Sin embargo, para trasladar esta compatibilidad a una certidumbre sobre el origen común de las muestras, serían necesarios argumentos cuantitativos complementarios e independientes de la composición química y/o de otros indicadores, como pueden ser aportes no sedimentarios o edáficos, como por ejemplo el contenido en polen o la contribución de contaminantes ambientales en un determinado contexto.

La responsabilidad de las identificaciones en el ámbito forense implica que las afirmaciones deben estar exentas de especulación e ir acompañadas del grado de certidumbre, evaluación de la representatividad de las muestras y de la variabilidad a la escala del factor condicionante natural que configura su composición. Todo lo anterior define que, en muchas ocasiones, el criterio de evaluación de los datos analí-

ticos debe ser ponderando y analizado más allá del valor cuantitativo, considerando la evaluación de la representatividad y la fiabilidad real del dato en el contexto de análisis en el que se lleva a cabo y para el que se realiza. Este aspecto, habitual en el ámbito académico o científico, puede contrastar con la evaluación técnica de los resultados, en los que la fundamentación se realiza únicamente amparada en la resolución instrumental de las técnicas empleadas. Todo lo anterior supone la necesaria evaluación de contexto, previa y detallada, y de los rangos de certidumbre y significado de resultados, estableciendo los factores reales precondicionantes. Este aspecto es de mayor importancia para los casos en que es necesaria la evaluación de cara a procesos judiciales en los que se pueda excluir, como fue mencionado en la introducción, el efecto CSI, que fundamenta la evaluación de los resultados exclusivamente en la resolución instrumental y sin considerar el contexto local de cada uno de los análisis en los que el campo de la geología tiene sobrado conocimiento del significado de las muestras puntuales y de la consideración de la variabilidad natural del medio sedimentario y pedogenético y de las incertidumbres asociadas.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a los revisores, cuyas aportaciones han contribuido a mejorar el presente artículo.

Referencias

- Croft, D.J. y Pye, K. (2004). *Science & Justice* 44, 21-28.
- Hernández Samaniego, A., Aragonés Valls, E., Aguilar Tomás, M.J., Ramírez del Pozo, J., García Alcalde, G.L., Arbizu Senosiain, M. y Ramírez del Pozo, J. (1980). *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 410 (La Almunia de D.ª Godina) y memoria*. IGME, Madrid, 40 p.
- Marumo, Y. (2002). *Japanese Journal of Science and Technology for Identification* 7, 95-111.
- Morgan, R.M. y Bull, P.A. (2007). *Progress in Physical Geography* 31, 43-58.
- Murray, R. y Tedrow, J.C.F. (1975). *Forensic Geology: Earth Sciences and Criminal Investigation*. Rutgers Univ. Press, New York, 240 p.
- Pettijohn, F.J. (1957). *Sedimentary Rocks*. Harper & Brothers, New York, 2nd ed. 718 p.
- Pye, K., Blott, S.J. y Wray, D.S. (2006). *Forensic Science International* 160, 178-192.
- Thornton, J.I. (1986). *Forensic Science Progress*, vol. 1, *Forensic Soil Characterization*. Springer Verlag, Berlin, 1-35.