

UTILIZACIÓN DE UN EQUIPO PORTÁTIL DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X PARA EL ESTUDIO DE METALES PESADOS EN SUELOS: PUESTA A PUNTO Y APLICACIÓN A VERTEDEROS

Gutiérrez-Ginés, M.^a J.¹ y Ranz, I.²

¹ Dpto. de Ecología, Universidad de Alcalá, Madrid.

² Servicio de Análisis, Centro de Ciencias Medioambientales, CSIC, Madrid.

Planteamiento del trabajo

Dado el interés medioambiental que tiene en la actualidad la localización y determinación de metales pesados en vertederos clausurados, se hace imprescindible no ir *a tientas* en la fase de toma de muestras edáficas, muchas de ellas con contenidos banales de metales en detrimento de otros posibles puntos fuertemente contaminados. Esta situación nos ha llevado a la búsqueda de técnicas que nos permitan conocer en el menor tiempo posible y también con el menor gasto económico, los metales pesados en suelos de emplazamientos contaminados. Por ello nos inclinamos por la utilización de un equipo portátil de fluorescencia de rayos X (FRX). Su puesta a punto y la aplicación a vertederos, la presentamos a continuación.

1. Fundamentos de la técnica

La fluorescencia de rayos X (FRX) es una técnica analítica instrumental no destructiva que mide la composición elemental de una sustancia generalmente sólida al ser expuesta a una radiación de rayos-X.

Los rayos X poseen una energía tal que al incidir sobre la muestra pueden ionizarla expulsando electrones de las capas más internas. Estos iones son altamente inestables y esas vacantes son ocupadas por electrones de capas superiores en cascada. Estos saltos de electrones de un nivel de mayor energía a uno de menor desprenden una radiación característica que es la fluorescencia de rayos X (figura 1). El conjunto de los saltos elec-

trónicos entre capas de un elemento forma el espectro característico del elemento y es único.

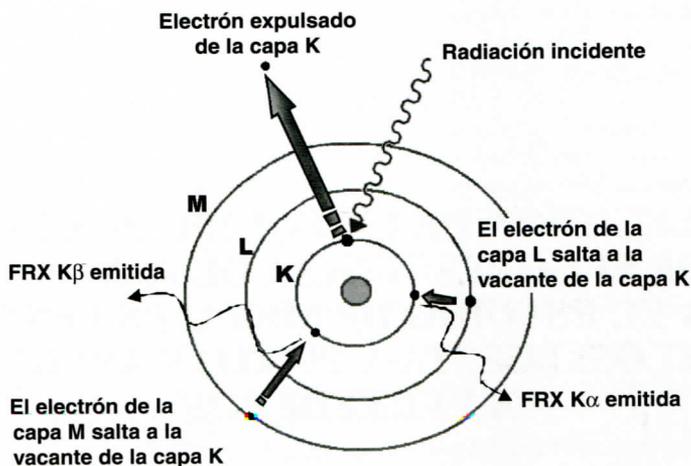


Figura 1: Esquema de la emisión de la radiación de fluorescencia de rayos X

El análisis cualitativo se obtiene a partir de la energía característica, o su longitud de onda, de la radiación de fluorescencia de rayos-X emitida. El análisis cuantitativo se obtiene por conteo de los rayos-X para una longitud de onda determinada. Los contenidos elementales son contenidos totales, sin distinción de estados de oxidación.

Un espectrómetro de FRX consta de tres partes fundamentales: la fuente que genera los rayos-X (un tubo o una fuente radiactiva); un detector que convierte los rayos X emitidos por la muestra en una señal electrónica susceptible de ser medida; y una unidad de procesamiento que registra la señal y calcula la concentración elemental en la muestra.

El tiempo de exposición de la muestra a la radiación depende de la calidad requerida en el análisis siendo lo habitual entre 30 y 600 segundos. Los límites de detección también disminuyen con el incremento del tiempo de medida. Respecto al límite de detección no es este el único factor sino que hay otros de mayor incidencia: efecto físico de la matriz (propiedades físicas de la muestra, como el tamaño de la partícula); el efecto químico de la matriz (efectos de absorción de la radiación emitida por otro elemento del entorno; solapamiento de líneas de diferentes elementos...) y los contenidos de varios componentes en torno al 10% que afectan la transmisión de rayos-X. Por todo ello es de gran importancia el diseño del análisis desde la recogida de muestra, su preparación, molienda, homogeneización y calibración del equipo para ese tipo de muestra. El método 6200 de la EPA SW-846 recomienda como hacer el muestreo y el análisis en FRX (EPA, 2006).

La detección de esta fluorescencia y el modo en el que se dispersa da lugar a diferentes técnicas analíticas.

Las que dispersan a través de cristales las distintas longitudes de onda requieren de un tamaño físico suficiente para albergar la parte óptica por lo que son técnicas de laboratorio.

La dispersión de energías, en cambio, se hace a través del mismo detector que funciona como discriminador de altura de impulsos.

Hasta hace poco estos detectores requerían estar sometidos a temperaturas muy bajas por lo que era necesario mantenerlos refrigerados por N₂ líquido lo que también lo convertían en técnicas de laboratorio aunque ya desde los años 80 se empezaron a fabricar los equipos portátiles de tamaño medio que se desplazaban sobre ruedas.

2. El equipo portátil de FRX

El desarrollo de las nuevas tecnologías con sistema de enfriamiento de Peltier ha posibilitado la construcción de equipos de rayos-X portátiles.

Estos equipos permiten un análisis inmediato e in-situ de los posibles contaminantes. Aunque los límites de detección de este tipo de analizador son superiores a su equivalente de laboratorio, cuando se emplea en búsqueda de contaminantes normalmente los rangos buscados están por encima de dichos límites.

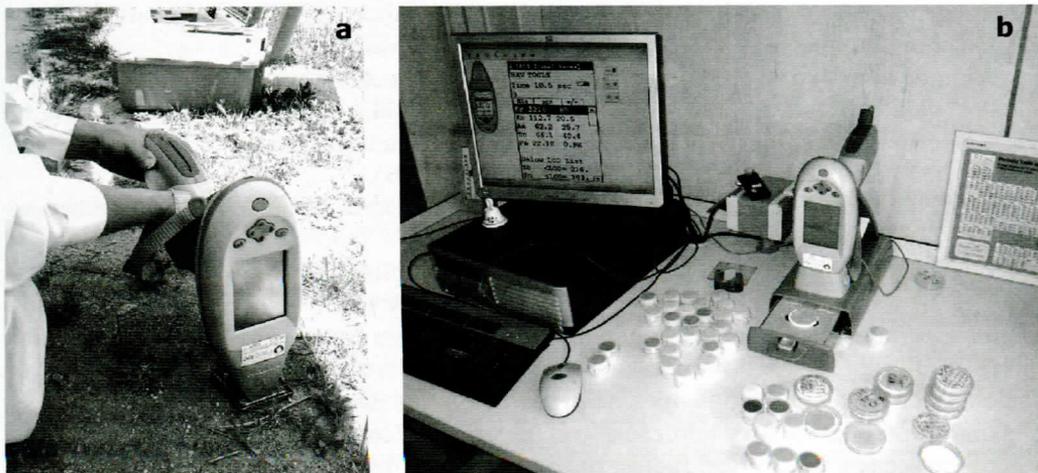


Figura 2: Equipo Niton haciendo análisis in situ (a) y en laboratorio (b)

Los elementos a determinar se seleccionaron en función de diversos criterios: la posibilidad de ser medidos por esta técnica, la frecuencia con que esos elementos son de interés en medidas ambientales, el riesgo potencial en medioambiente y humanos.

El equipo utilizado es un Niton XLt 792WY. Se trata de un analizador elemental de fluorescencia de rayos-X portátil manual y de una sola pieza, que utiliza como fuente de excitación un tubo de rayos X de baja intensidad, 40kV, y ánodo de Rh, con rango de análisis desde Cl hasta U, detector Peltier refrigerado de alta resolución Si-PIN y dos baterías de Li de ocho horas de autonomía. Su peso es menor de 2 kg.

Es un equipo portátil que permite hacer análisis en campo, con una semipreparación, pero tiene la posibilidad de conectarse a un ordenador para realizar análisis en laboratorio (figura 2), para la muestra seca, tamizada, molida y prensada.

El equipo viene calibrado con patrones internacionales de suelo para realizar análisis simultáneos de Ag, As, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Mn, Ni, Pb, Rb, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ti, V, Zn y permite hacer correcciones de calibraciones empíricas.

3. Puesta a punto del equipo portátil y validación de las medidas

La FRX como ya se ha explicado es una técnica indirecta que precisa de la comparación con patrones, es este un handicap importante a la hora de aplicarlo a contaminación debido a la escasez de patrones certificados puesto que la contaminación no sigue patrones ordenados, sino que cabe esperar una gran variedad o dispersión de datos y dada la carencia de patrones internacionales puede ser necesario preparar patrones con rangos de elementos contaminantes altos.

Para la preparación de dichos patrones se utilizó un suelo árido que estaba muy bien caracterizado y que tiene contenidos extremadamente bajos de metales. A este suelo se le añadieron diferentes cantidades de metales pesados partiendo de soluciones patrón certificadas y que tras un proceso de homogeneización y secado volvieron a ser molidas y homogeneizadas. Se realizaron varias series para comprobar tanto la linealidad de los rangos como la precisión en las medidas de los contenidos.

Aunque como ya se ha dicho el equipo mide la concentración de un total de 22 elementos, para la puesta a punto, nos hemos centrado en el As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn, puesto que resultan más interesantes para la caracterización de cubiertas edáficas con las que han sido sellados muchos vertederos (VRS).

Para ello, hemos utilizado tanto patrones como muestras de suelo de un vertedero sellado de la Comunidad de Madrid.

Los patrones usados han sido un total de 74. De ellos, 38 son patrones internacionales, y 36 son patrones preparados por nosotros, tal y como se ha explicado anteriormente. Las muestras de suelos se han tomado en la capa superficial (0-10 cm) de la cubierta edáfica utilizada como sellamiento del vertedero de Getafe. Las muestras de suelo usadas han seguido dos tipos de preparación: las llamadas, a partir de ahora, «sin preparar», fueron secadas y tamizadas con un tamiz de 2mm; las llamadas «preparadas», a parte de secas y tamizadas, fueron molidas con un mortero de ágata y preparadas en dispositivos.

La puesta a punto ha consistido, primeramente, en un análisis de la exactitud de las medidas del equipo mediante la comparación con los patrones. Posteriormente, un estudio de la precisión de las medidas y del límite de detección de las mismas, así como de la influencia del tiempo de medida y del tipo de preparación de la muestra en los resultados, para lo cual se han usado tanto patrones como muestras de suelo del vertedero de Getafe.

3.1. Análisis y mejora de la exactitud de la medida mediante el uso de patrones

Los equipos portátiles se calibran en fábrica para un tipo de muestra, en nuestro caso, para suelos, que no presentan contenidos altos de los metales considerados contaminantes; pero el software permite ajustar la exactitud en la medida de dichos elementos

mediante patrones. Esto se hace modificando los factores de calibración predeterminados en el equipo con los factores de corrección calculados a partir de la relación entre los datos teóricos y los empíricos, haciendo tantas reiteraciones para cada elemento como sea preciso.

Tras elegir el factor de calibración más adecuado se mide el conjunto de patrones nuevamente, y se calcula la relación entre el resultado de la medición y la concentración del patrón (concepto de exactitud según la EPA, 2006). Los resultados para los patrones citados se muestran en la tabla 1.

Tabla 1: Relación entre la medida y la concentración del patrón. n: número de patrones que se pudieron utilizar para la correlación.

	Rango concentración patrones usados	Resultados de la correlación		
		Pendiente	R ²	n
As	(9 – 1660 ppm)	0,91	0,9622	7
Cd	(25 -750 ppm)	1,14	0,9084	13
Cu	(9 – 5000 ppm)	1,16	0,9976	27
Fe	(4620 – 179550 ppm)	0,73	0,9512	33
Mn	(217 – 5965 ppm)	0,95	0,958	30
Ni	(75 – 2380 ppm)	0,89	0,9966	16
Pb	(8-5000ppm)	1,14	0,9972	37
Zn	(28 – 1300 ppm)	1,05	0,9897	33

La medida del **arsénico** es bastante exacta y precisa en todo el rango de concentración de los patrones. Sin embargo se pueden encontrar problemas de falsas lecturas negativas incluso en casos en los que la concentración del elemento es bastante elevada. Este problema puede estar relacionado con el contenido en plomo, tal y como se comentará más adelante.

Para el calibrado el **cadmio** se utilizaron patrones preparados por nosotros y sólo uno internacional. La R² para la serie de nuestros patrones es 0,993 y la pendiente 1,40 por lo que se opta por el calibrado total en el que R² empeora (0,908), pero la pendiente mejora hasta 1,14. Se puede concluir que la calidad de la medida es buena, aunque el límite de detección está entorno a 20 ppm, lo que para el caso del Cd es demasiado alto.

La medida del **cobre** en general es de buena calidad, aunque las medidas de patrones de contenidos menores de 100 mg/kg presentan una alta variabilidad lo que disminuye su fiabilidad en este rango. Sin embargo las medidas de patrones con contenidos mayores son de una precisión superior al 10%. Éste es, precisamente, el rango más interesante, puesto que según la EPA (EPA, 2006), son las concentraciones mayores de 100 mg/kg las consideradas potencialmente fitotóxicas.

Las medidas del **hierro** tienen una relación claramente de segundo orden respecto a la concentración de los patrones, como se puede ver en la figura 3. Por lo tanto hay tres rangos de concentración con comportamientos diferentes:

- Un rango hasta 80.000 mg/kg aproximadamente, en el que el equipo infravalora el contenido en hierro.
- Entre 80.000 y 110.000 mg/kg aproximadamente el equipo mide de forma adecuada.

— Finalmente por encima de 110.000 mg/kg el equipo sobrevalora la cantidad de hierro.

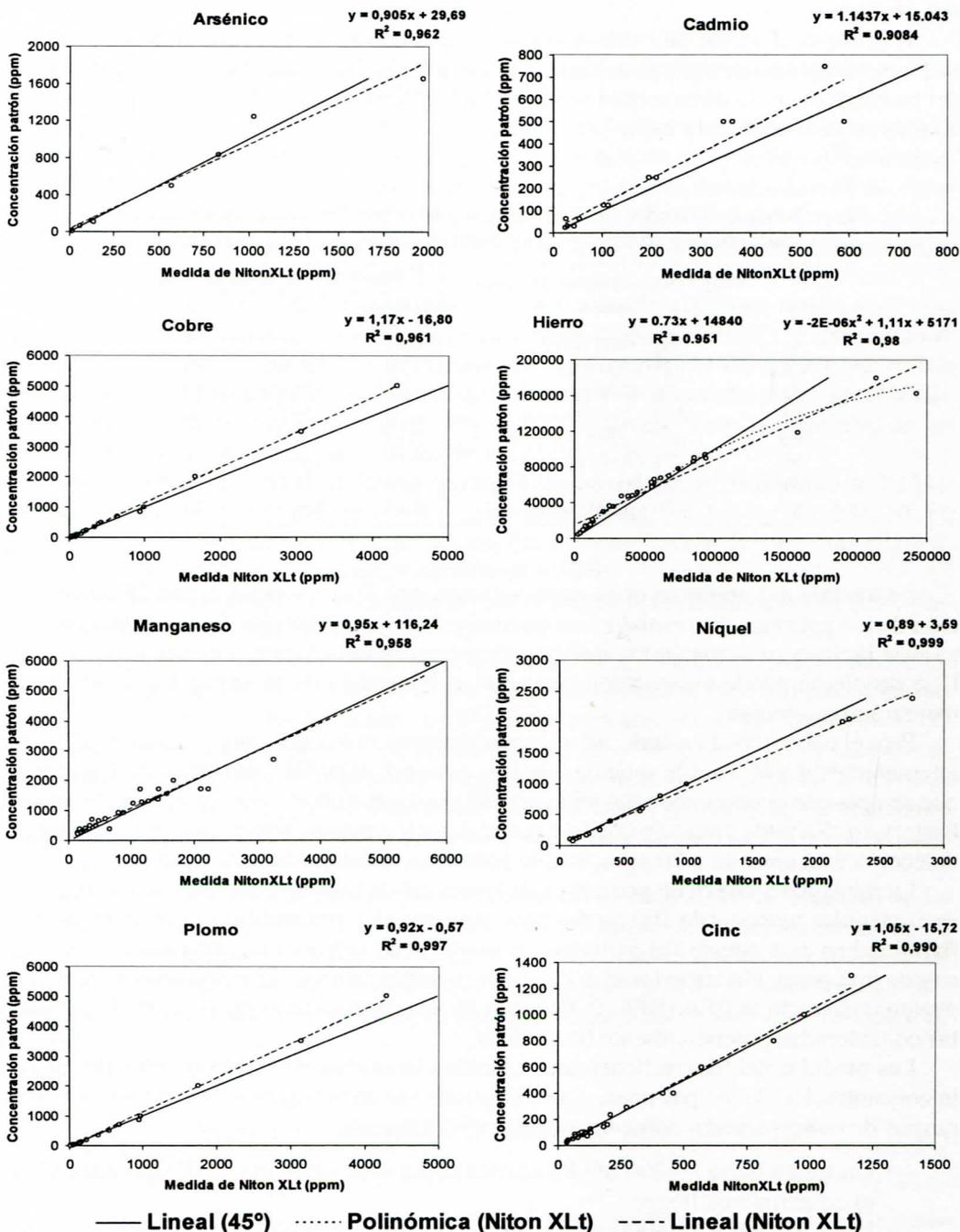


Figura 3: Correlaciones entre las medidas del equipo y los valores de los patrones

En FRX, por los efectos de autoabsorción, el contenido de hierro debe medirse frente a un calibrado de segundo orden. El equipo portátil no lo permite y por eso se recomienda utilizar varias curvas de calibración en los diferentes tramos.

En general las medidas del **manganeso** son bastante variables y menores que los valores del patrón, pero no se alejan mucho de éste. La calidad es aceptable en todo el rango considerado.

Las medidas del **níquel** y **cinc** no presentan gran variabilidad, su calidad es bastante buena en todo el rango considerado.

La calidad de la medida del **plomo** es muy buena. Las medidas no presentan mucha variabilidad y son muy exactas en todo el rango considerado.

En la figura 3 se muestran las correlaciones entre las medidas realizadas con el equipo y los valores patrones.

3.2. Influencia de la preparación de la muestra

Para comprobar cómo afecta el tipo de preparación a la medida se han medido 18 muestras del vertedero de Getafe por un lado preparadas, y por otro lado sin preparar.

El conjunto de las medidas realizadas sobre muestras sin preparar se ha comparado, mediante una relación, con las medidas realizadas sobre muestras preparadas. Las medias de los resultados se muestran en la tabla 2.

Tabla 2: Relación entre las medidas de muestras preparadas y no preparadas. P: medida de muestras preparadas, S: medida de muestras sin preparar, M: media de las relaciones, s.d: desviación estándar de las relaciones.

	Relación P/S	
	M	s.d.
As	1,37	0,76
Cd	1,85	0,25
Cu	1,27	0,22
Fe	1,31	0,44
Mn	1,33	0,32
Ni	1,99	0,51
Pb	1,41	0,41
Zn	1,44	1,00

En general los contenidos encontrados en muestras preparadas son más altos, lo que es debido a la reducción del tamaño de partícula en la muestra preparada. Cuando se mide *in situ* existen huecos entre granos y aparece el efecto *tamaño de partícula*. Esto hace que parte de la radiación se pierda en la muestra, no vuelva al detector y el contenido calculado sea menor.

También se han medido cinco muestras en el campo, que luego se han trasladado al laboratorio y se han medido por un lado secas y tamizadas y posteriormente molidas y preparadas. Comprobándose que contenidos de humedad menores de 20% no afectan a la medida tal como indica la fábrica en las especificaciones del equipo.

3.3. Influencia del tiempo de medición

El equipo permite variar el tiempo que se tarda en tomar la medida. Puesto que cuanto mayor sea el tiempo de exposición mejor será la lectura, tanto en precisión como en exactitud, conviene buscar el tiempo óptimo.

Para este análisis hemos usado tres patrones internacionales que fueron medidos 6 veces usando crecientes tiempos de medición.

En los contenidos altos el único resultado apreciable es que disminuye el error de la lectura que hace el equipo.

El límite de detección disminuye cuando aumentamos el tiempo de medida, por eso en muestras con contenidos próximos al límite de detección puede no obtenerse señal en tiempos menores de 120 o incluso 240 segundos, como es el caso de cobre y níquel, en concentraciones alrededor de 20 mg/kg.

Normalmente si no aparecen estos contenidos en tiempos cortos es que están en cantidades próximas al límite de detección y sólo si son de interés se debe exponer la muestra a tiempos más largos.

En general, en las muestras del vertedero, con 60 segundos se pueden detectar los elementos con un nivel de detección adecuado.

3.4. Estudio de repetibilidad

Para el análisis de repetibilidad (o precisión según los textos) se han usado por un lado tres patrones internacionales, y por otro lado seis muestras tomadas del vertedero de Getafe. En este último caso se han analizado por un lado las muestras preparadas y por otro sin preparar. En todos los casos se han realizado doce medidas de las muestras y patrones. Se ha calculado el coeficiente de variación de cada elemento para cada una de las muestras y patrones. En la tabla 3 se muestran los coeficientes de variación medios y los rangos de cada elemento para patrones y para cada tipo de preparación de las muestras.

Tabla 3: Media y rango de los coeficientes de variación de las pruebas de precisión por metales y en función de la preparación.

	Patrones		Muestras preparadas		Muestras sin preparar	
	CV medio (%)	Rango	CV medio (%)	Rango	CV medio (%)	Rango
As	9	(3, 19)	19	(13, 23)	20	(7, 37)
Cd	2		8	(7, 9)	14	(5, 22)
Cu	16	(5, 21)	6	(2, 12)	14	(2, 32)
Fe	1	(1, 1)	2	(2, 3)	5	(2, 10)
Mn	8	(5, 13)	6	(3, 9)	9	(5, 17)
Ni	10	(4, 16)	17	(11, 23)	22	(13, 34)
Pb	9	(5, 13)	7	(2, 17)	11	(4, 27)
Zn	11	(8, 16)	4	(3, 8)	6	(4, 9)

Los resultados varían en función de la concentración, siendo peores en muestras con contenidos bajos de metales. La precisión aumenta en muestras con contenidos altos de metales, que son, precisamente, los de interés en los estudios de contaminación. También se puede observar en la tabla, que la precisión de las muestras tras ser preparadas aumenta bastante con respecto a las muestras sin preparar.

3.5. Límites de detección

Los límites de detección medios en muestras del vertedero, según el cálculo de equipo, se muestran en la tabla 4.

Tabla 4: Límites de detección de las muestras del vertedero de Getafe (M) y patrones (P).*
El elevado límite de detección del As está relacionado con la interferencia del Pb.

	Cd M	Cd P	As M	As P	Cu M	Cu P	Ni S	Ni P	Zn P	Pb P	Mn P
Media	24,2	24,3	83,5	11,1	22,9	30,2	51,2	54,9	20,4	11,8	60,33
Máximo	42,7	33,1	339,3 *	15,8	25,2	46,4	111,9	119,6	23,2	19,8	70,0

4. Aplicación de la técnica para el conocimiento de metales in situ en el vertedero sellado de Getafe

El vertedero de Getafe, del cual hemos usado las muestras para la puesta a punto del equipo, está ubicado sobre un sustrato de margas calizas y yesíferas. Después del primer sellado en 1986, se volvió a utilizar para poner encima, en teoría, residuos inertes, pero en realidad había también residuos industriales y residuos orgánicos. Posteriormente en 1993-94 se utilizó nuevamente para depositar escombros industriales, especialmente escorias de hierro y de la industria del acero. En la actualidad pues, se trata de un vertedero mixto, con taludes superpuestos, unos encima de otros a los que se han unido dos escombreras de grandes proporciones (Pastor y Hernández, 2007; Hernández y Pastor, 2008).

Teniendo en cuenta la heterogeneidad en la distribución y concentración de los contaminantes en estos emplazamientos, el número de muestras y análisis necesarios es muy elevado. Por lo que es conveniente tener una idea de la distribución espacial de los metales con el fin de ahorrarnos un volumen grande de análisis de muestras. Es en este aspecto en el que un equipo portátil, que permite realizar análisis multielementales en pocos minutos, muestra su máximo potencial. Otros autores como Loredó (2003) y Martín *et al.* (2008) ya han hablado de la aplicación de este equipo en el estudio de suelos contaminados.

En el caso del vertedero de Getafe, y como ya hemos comentado anteriormente, el equipo mide de forma aceptable en todo el rango. Los únicos problemas los encontramos con el hierro y con el cobre para concentraciones menores de 100 mg/kg. Sin embargo en este caso, esto no supone un importante problema puesto que si se observa la tabla 5, son las concentraciones mayores de 100 mg/kg las consideradas potencialmente fitotóxicas y por lo tanto peligrosas para las comunidades vegetales.

Tabla 5: Niveles máximos de metales y otros elementos en suelos.

	Efectos fitotóxicos (ppm) (EPA, 2006)	Efectos en humanos (ppm) (EPA, 2006)	Niveles genéricos de referencia (ppm) (CM, 2006)
As	10	0,39 (efectos no cancerígenos) 22 (efectos cancerígenos)	24
Cd	4	37	3
Cu	100	3100	80
Mn			690
Ni	30	1600	405
Pb	50	400	75
Zn	50	23000	1170

La primera columna muestra las concentraciones a partir de las cuales se pueden producir efectos tóxicos en plantas según la EPA (2006), la segunda columna hace referencia a las concentraciones límite para la salud humana (EPA, 2006), y en la tercera columna se exponen los niveles genéricos de referencia para protección de la salud humana de la Comunidad de Madrid (CM, 2006). En este caso, se ha elegido la opción «otros usos», es decir suelos con usos distintos del urbano y el industrial, por ser los límites más restrictivos.

Por otro lado, vemos que los niveles más restrictivos de la tabla superior entran dentro de los rangos detectados y fiables, excepto en el caso del cadmio, níquel y arsénico. A pesar de ello, las muestras de vertederos normalmente muestran más de un elemento pesado, y en el caso de las muestras de Getafe, siempre más de cuatro metales, por lo tanto el hecho de detectar uno en cantidades bastantes altas, ya nos puede parecer interesante para llevar al laboratorio y hacer un análisis más preciso. En caso de no detectar estos metales podemos encontrarlos, si están, por medio de otras técnicas de laboratorio, o aumentando el tiempo de medición.

El caso mas limitante en las muestras del vertedero es el de la relación As-Pb. Según la EPA (2006) las interferencias espectrales entre arsénico y plomo pueden modificar los límites de detección y la exactitud en análisis por FRX cuando la relación Pb:As es de 10:1 o mayor.

Hemos podido comprobar que en aquellas muestras del vertedero de Getafe donde la concentración de plomo es muy alta, a veces no se detecta arsénico, encontrando límites de detección mayores de 300 mg/kg. En esos casos, siempre la relación As:Pb era mayor de 1:10. Pensamos que los contenidos de Plomo son fiables pero los de As pueden quedar enmascarados por el aumento del límite de detección. Este es el caso de varias muestras donde los contenidos de Pb son del orden 10^4 , mientras que obtenidos para As son del orden de 5×10^2 , encontrando que de las 12 medidas realizadas en 7 se obtiene resultados por debajo del límite de detección que estima en 3×10^2 y en 5 se pueden leer valores. Esta situación mejora considerablemente cuando se trabaja con las muestras preparadas pero sugerimos que si se encuentran valores altos de plomo deben realizarse *in situ* varias determinaciones con tiempo de medición mayor para tratar de leer en algún caso la posible presencia de As.

De todas formas, el hecho de que el Pb dé contenidos altos, hará que esa muestra sea seccionada para su posterior análisis en laboratorio donde se pueda determinar el As en presencia de altos contenidos de Pb por otras técnicas analíticas.

La situación se complica si el contenido del plomo es al menos diez veces menor que el de arsénico, pues en ese caso podemos tener límites de detección de arsénico bajos, contenidos altos, y no detectarlo. Este caso lo hemos constatado en las medidas de patrones, pero no en las de muestras del vertedero donde el contenido de plomo siempre es alto.

5. Conclusiones

La ventaja principal de este tipo de equipos reside en la posibilidad de hacer análisis exploratorios *in situ* de sitios potencialmente contaminados, reduciendo de forma muy significativa la cantidad de análisis de laboratorio y por tanto el coste final y el tiempo del estudio. También permite la realización de medidas más precisas con una semipreparación en campo. Evidentemente, estos análisis son complementarios a medidas posteriores con otras técnicas más precisas, como por ejemplo la espectroscopia de emisión de plasma.

En general, la calidad de medida del equipo de FRX es aceptable pudiendo ser utilizado de forma fiable para realizar investigaciones exploratorias de sitios desconocidos. Las principales aplicaciones de esta técnica en la identificación de contaminantes en suelos de vertederos sellados están relacionadas con los estudios de *screening* de los emplazamientos, y con la monitorización de las tareas de restauración. En el primer caso su uso puede ayudar a hacerse una idea de la magnitud del problema, identificar puntos calientes, detectar anomalías, seleccionar áreas interesantes para análisis más precisos en laboratorio y delimitar la contaminación. Estas ventajas son compartidas por Loredó (2003).

Las limitaciones que presenta esta técnica son límites de detección altos y efectos de matriz, pues la presencia de altas concentraciones de metales pesados puede producir interferencias espectrales.

Sin embargo, consideramos que las medidas del equipo son suficientemente buenas para las tareas para las que está enfocado y hoy por hoy es la técnica más idónea para la labor de *screening* de puntos calientes en vertederos.

Agradecimientos: Proyecto CTM 2008-04827/TECNO, financiado por el MCEI

Referencias bibliográficas

- CM (2006). ORDEN 2770/2006, de 11 de agosto, del Consejero de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, por la que se procede al establecimiento de niveles genéricos de referencia de metales pesados y otros elementos traza en suelos contaminados de la Comunidad de Madrid.
- EPA (2006). *Innovative Technology Verification Report. XRF Technologies for measuring trace elements in soil and sediment. Niton XLt 700 series. XRF Analyzer*. Informe EPA/540/R-06/004.
- HERNÁNDEZ, A. J. y PASTOR, J. (2008). Validated approaches to restoring the health of ecosystems affected by soil pollution (Chapter 2).¹ *Soil Contamination Research Trends*, ed. J. B. DOMÍNGUEZ, Nova Science Publishers, pp. 51-72.

- LOREDO, J. (2003). Instrumentación de campo para la detección y cuantificación de metales en suelos. *Operatividad de la instrumentación en aguas subterráneas, suelos contaminados y riesgos geológicos*. IGME, Madrid: 175-184.
- MARÍN, F.; MORALES-RUANO, S.; BAGUR, M.; ESTEPA, C.; FERNÁNDEZ, E.; DIEZ, M., y AGUILAR, J. (2008). «Utilización de fluorescencia de rayos X portátil en el estudio de suelos potencialmente contaminados». *III Congreso Ibérico de la Ciencia del Suelo*. Évora. Portugal. Junio 2008: 195.
- PASTOR, J. y HERNÁNDEZ, A. J. (2007). «La restauración en sistemas con suelos degradados: estudios de casos en vertederos, escombreras y emplazamientos de minas abandonadas». *Contaminación de Suelos. Tecnologías para su recuperación*. Ed.: MILLÁN, R. y LOBO, C., CIE-MAT, pp: 539-560.

Estudio multidisciplinar de vertederos sellados

Caracterización y pautas de recuperación

Editoras:

Ana Jesús Hernández

Carmen Bartolomé



Universidad
de Alcalá

SERVICIO DE PUBLICACIONES



R. 20.452

El contenido de este libro no podrá ser reproducido,
ni total ni parcialmente, sin el previo permiso escrito del editor.
Todos los derechos reservados.

© Universidad de Alcalá, 2010
Servicio de Publicaciones
Plaza de San Diego, s/n
28801 Alcalá de Henares
www.uah.es

I.S.B.N.: 978-84-8138-865-7
Depósito Legal: M-11864-2010

Diseño de cubierta: Gráficas 85, S. A.
Composición: Gráficas 85, S. A.
Impresión y encuadernación: Gráficas 85, S. A.
Impreso en España

