

SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA COMO HERRAMIENTA PARA EVALUAR LA APORTACIÓN ANTROPICA DE MERCURIO EN SUELOS

*José Antonio Rodríguez Martín, Gregoria Carbonel Martín, José Manuel
Grau Corbí**

RESUMEN

Este trabajo evalúa el contenido y la variabilidad espacial de mercurio en suelos agrícolas de Islas Baleares y Canarias utilizando técnicas integradas en los sistemas de información geográfica. El propósito de este estudio ha sido valorar el contenido y distribución del mercurio en el suelo y distinguir la contribución considerada como natural, y procedente del aporte de la roca de origen, de la inducida por actividades humanas, considerada como contaminante. El SIG se muestra como una tecnología capaz de localizar fuentes de contaminación y proporcionar el alcance de éstos. Los mapas generados con la relación de Hg_suelo/Hg_roca han permitido cuantificar las entradas de este metal en el suelo y evaluar el enriquecimiento de mercurio en el mismo. Valores excesivamente elevados encontrados en un área de la Isla de Mallorca son atribuibles a las emisiones de una planta eléctrica de carbón cercana.

PALABRAS CLAVE: Análisis espacial, SIG, geostatística, mercurio, contaminación de suelos

ABSTRACT

This study assesses Hg concentration and the spatial variability of mercury in agricultural soils of the Balearic and Canary Islands using integrated techniques of geographic information systems. The purpose of this study was to characterize in quantitative terms the mercury concentrations and to distinguish “natural” mercury contribution from that of human-induced contamination. GIS is

* Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (I.N.I.A.)
C.I.F.O.R. Ctra. de la Coruña Km, 7,5; 28040 Madrid. España. e-mail: rmartin@inia.es.
Tfno: +34 913476795

Fecha recepción: 10 febrero del 2010
Fecha aprobación: 12 de junio del 2010

shown to be technologically capable of locating sources of pollution and assessing their scope. The top soil/rock mercury content maps showed a high level of mercury in the same areas. Excessively high Hg values found in an area of the island of Mallorca are attributable to emissions from a coal-fired power plant nearby.

KEYWORDS: Spatial analysis, GIS, geostatistic, mercury, soil contamination

1. INTRODUCCIÓN

La tecnología de los sistemas de información geográfica (S.I.G) está fundamentada en el uso de datos espaciales. Los SIGs están siendo utilizados cada vez más en un mayor número de disciplinas (Peña, 2006), actualmente se emplean de forma común en cuestiones medioambientales. Por lo cual, adquieren mayor interés en el estudio de contaminantes que puedan suponer un riesgo para la salud humana.

El mercurio no es un elemento abundante en la naturaleza. La concentración en suelos a nivel mundial oscila entre 10 y 200 $\mu\text{g kg}^{-1}$ (Adriano, 1986; Tack *et al.*, 2005), o según otros estudios, entre 10 $\mu\text{g kg}^{-1}$ y 500 $\mu\text{g kg}^{-1}$ (Alloway, 1995), considerando como normales en la naturaleza valores inferiores a 50 $\mu\text{g kg}^{-1}$. No obstante, pese a su baja concentración en el suelo, su presencia puede suponer un importante riesgo (Mark y Ralph, 2001). El contenido mercurio en el suelo depende principalmente del material original, sin embargo factores humanos, como las actividades industriales, minería, la quema de combustibles fósiles, la incineración de basuras y otras fuentes de emisión de contaminantes incrementan la emisión de mercurio a la atmósfera. En general, las acumulaciones de mercurio en suelos están asociadas a la deposición atmosférica (Engle *et al.*, 2005); sin embargo entre el 60 y 80% de la emisión global del mercurio a la atmósfera procede de actividades humanas. Por otro lado, el mercurio puede permanecer en la atmósfera entre 0.5 y 2 años antes de ser depositado en el suelo (Navarro *et al.*, 1993), lo que le permite ser transportado a largas distancias de las fuentes de emisión.

En la actualidad, existen diversas herramientas que puede utilizarse en la realización de estudios de distribución superficial, entre ellos, los SIGs actuales ofrecen métodos apropiados para llevar a cabo estudios de análisis espacial de características del suelo y del medio, aunque con ciertas limitaciones. Por ello, y con el fin de conseguir una mayor precisión en la estimación de valores, es necesario recurrir a un análisis geoestadístico previo, que nos ayude a conocer la relación entre los datos, la dependencia

espacial, el modelo de interpolación y los parámetros que lo constituyen, así como los errores cometidos al modelizar. Todos ellos son factores que se suelen omitir debido a la facilidad de uso de muchos SIGs y a veces dan lugar a interpretaciones erróneas o no muy exactas cuando no se utilizan modelos apropiados o no se analizan los datos previamente. En definitiva un SIG es una herramienta que integra datos espaciales, incorporando diversas técnicas de análisis espacial. De entre estas herramientas de análisis espacial, destacan los métodos de interpolación, procedimientos para predecir un valor donde no se ha muestreado, convirtiendo observaciones puntuales en superficies continuas.

La geoestadística se define como la aplicación de la Teoría de Funciones Aleatorias al reconocimiento y estimación de fenómenos naturales (Journel y Huijbregts, 1978), o simplemente, el estudio de las variables numéricas distribuidas en el espacio, siendo una herramienta útil en el estudio de contaminantes edáficos como el mercurio. La geoestadística se basa en la observación de la variabilidad o continuidad espacial de las variables distribuidas en el espacio, que tienen una estructura particular (Journel y Huijbregts, 1978). Procedimientos de interpolación como el Kriging (Goovaerts, 1997; Lin, 2002), incluidos en la mayoría de los SIGs, permiten extender la información analítica procedente de puntos de muestreo, a superficies continuas basándose en la variabilidad espacial entre observaciones. Otras herramientas incluidas en los SIG raster, permiten tratar la información espacial continua de forma matricial y operar con superficies al igual que si trabajáramos con cualquier variable.

El objetivo básico de este trabajo es caracterizar en términos cuantitativos la concentración de mercurio en suelos de los dos archipiélagos españoles. Generar mapas de concentración que puedan ser de utilidad para valorar la entrada de mercurio en los suelos e indicar la intensidad de este aporte y si es posible, la procedencia de este mercurio.

2. Material y Métodos

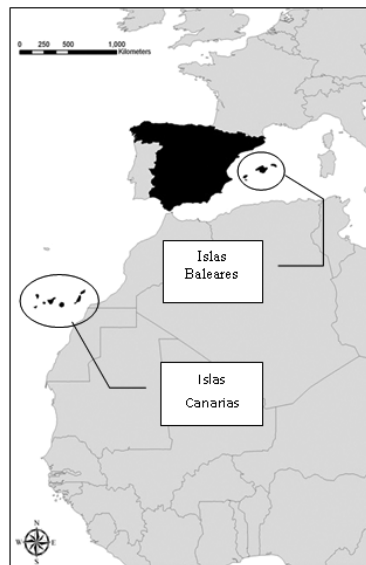
2.1. Área de estudio

El estudio se desarrolla en los dos archipiélagos españoles, que suponen complejos insulares aislados del continente, de distinto origen geológico y ubicación. Lo cual representa distintas condiciones e

influencias para poder analizar el contenido de mercurio en el suelo, así como valorar el enriquecimiento del mismo.

Las Islas Canarias suponen un archipiélago de siete islas de origen volcánico. Se localizan en el Océano Atlántico al Suroeste de España, cerca del Trópico de Cáncer y al Oeste de la costa de Marruecos. Las Baleares, por su parte presentan litologías calcáreas (calizas). Están formadas por cuatro islas que se localizan al Este de la Península Ibérica y en el extremo Oeste del Mar Mediterráneo (ver figura 1).

Figura 1: Localización de las zonas de estudio.



2.2. Muestreo y valoración del contenido de mercurio

El muestreo sistemático se realiza a partir de una malla de 8 km x 8 km que cubre toda la superficie estudiada, en la que se selecciona una parcela de toma de muestras en torno a cada uno de los nodos situados en área de cultivo o pastos. Identificándose cada parcela mediante ortofotografías (pixel de 1 m) y mapas topográficos de escala 1:25000. La toma de muestras se realizó entre 0 y 25 cm de profundidad. Cada muestra (aproximadamente unos 3 kg de suelo) fue secada y posteriormente

tamizada obteniendo una submuestra de los fragmentos rocosos superiores a 6 mm y otra, de tierra fina, inferior a 2 mm. La extracción de mercurio (Hg) se realizó mediante digestión por aqua regia (HNO_3 , HCl y H_2O_2) de acuerdo con el procedimiento ISO 11466 (International Organization for Standardization, 1995). La valoración del contenido total de mercurio se realizó mediante un espectrómetro de absorción atómica DMA80 (Milestone, Wesleyan University, Middletown, CT, USA).

2.3. Tratamiento geostatístico como base de análisis SIG

La geoestadística permite el estudio de los fenómenos naturales, considerando la dependencia espacial que se presenta entre observaciones. Las técnicas de interpolación se basan en que los valores de puntos más cercanos sean más similares entre sí, que los valores de puntos más distantes. Este principio es usado para predecir valores en áreas no muestreadas. Estas estimaciones pueden ser calculadas usando la siguiente fórmula:

$$\tilde{Z}_{ok}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \times Z(x_i)$$

Donde $Z(x_0)$ = valor de la variable Z en el sitio no muestreado x_0 , $Z(x_i)$ = valor observado $Z(x_i)$ de la variable Z en el sitio muestreado x_i , λ es la ponderación asignada al valor observado $Z(x_i)$ y n es el número de valores observados alrededor. Las diferencias entre las distintas técnicas de interpolación están en la forma de ponderación λ_i (ponderación por punto de muestreo i en la ubicación x_i).

El semivariograma se utiliza para analizar la variación espacial (Menezes *et al.* 2004) en una dirección, pero este comportamiento pueden variar según la dirección que se analice, como se discute en Journel y Huijbregts (1978). Cuando el semivariograma calculado en diferentes direcciones (norte-sur, este-oeste, y en direcciones intermedias de 45° o de 22.5° , con tolerancia de 22.5°), muestra similar comportamiento, se dice que el fenómeno es isotrópico, cuando muestran diferentes comportamientos es anisotrópico (Krajewski y Gibbs, 1993). En este estudio se asume un comportamiento anisotrópico al no observarse diferencias significativas

entre las distintas direcciones. El ajuste al mejor modelo matemático que se aproxima a explicar esta variación espacial, proporciona el valor de λ necesario para realizar el kriging. Los parámetros que se obtienen del semivariograma son: C_0 Nugget o efecto pepita, valor de la semivarianza para la distancia cero; C varianza estructural; C_0+C sill (umbral o silla) valor de la semivarianza en el que la curva se estabiliza sobre un valor constante; A_0 rango o distancia desde el Sill hasta el origen que describe la distancia a partir de la cual los puntos están autocorrelacionados (dependencia espacial). En este trabajo se busca el mejor ajuste a un modelo esférico para determinar estos parámetros. Se modeliza por separado cada archipiélago, tratándose en conjunto los valores de cada isla en base a la cercanía y origen geológico común.

El modelo esférico, más solvente en la estimación del nugget y más cercano al comportamiento del rango (Yemefack *et al.*, 2005), se define como (Goovaerts, 1998; Oberthür *et al.*, 1999):

$$\gamma_{(h)} = Sp h \left(\frac{h}{a} \right) = \begin{cases} c_0 + c \left(\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right) & \text{if } h \leq a \\ c_0 + c & \text{if } h > a \end{cases}$$

Donde $\gamma_{(h)}$ es la semivarianza, c_0 es el nugget, c es el sill, h es el intervalo de distancia y a el rango. En la práctica el rango es definido como la distancia a la cual el modelo alcanza el 95% del sill.

Las interpolaciones se han realizado mediante kriging ordinario con la extensión “Geostatistical Analyst” de ArcGis 9.2 (Johnston *et al.*, 2001). Existen diferentes algoritmos y variantes para el kriging, la mayoría de ellos se recogen en Goovaerts (1999) con referencia a aplicaciones en el suelo. Libros de texto (Clark, 1979; Gressie, 1991; Goovaerts, 1997; Kanevski y Maignan, 2004) y artículos (Goovaerts, 1998; Goovaerts, 1999; Ishida y Ando, 1999; Juang *et al.*, 2004) presentan más detalles sobre los métodos geostadísticos. En general las técnicas geostadísticas (como el Kriging) presentan mejores resultados (Hoobbs y Atkins 1988, Phillips *et al.* 1992) que las técnicas de interpolación tradicionales (Spline, Distancia Inversa Ponderada, Thissen, otras, etc). El Kriging, considerado “el me-

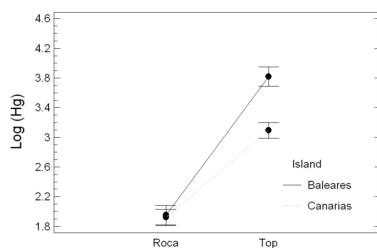
“el mejor estimador lineal insesgado” genera los resultados más próximos a las observaciones reales (Barazzuoli *et al.*, 1999). Los errores estándar del Kriging se utilizan para testar la precisión del Kriging como técnica de interpolación. Por otro lado, las herramientas de tratamiento raster permiten evaluar la proporción de mercurio en el suelo respecto al correspondiente a la roca y las relaciones entre ambos desde una perspectiva espacial.

3. Resultados y discusión

3.1. Contenido en mercurio en suelo y roca

La Tabla 1 presenta los valores medios y el número de muestras analizadas, tanto en suelo, como en los fragmentos rocosos para las Islas Canarias y Baleares. El contenido de mercurio, como era de esperar, se muestra más alto en el suelo que en la roca. Los valores más elevados se observan en las Islas Baleares. La Tabla 2, resume los principales estadísticos para el contenido en mercurio en ambas islas. Los rangos de concentración, obtenidos del análisis de los fragmentos rocosos, no muestra valores altos de mercurio. El valor medio en los suelos de las Islas Baleares, ha sido de $61.11 \mu\text{g kg}^{-1}$. Adriano (1986) y Tack *et al.*, (2005) caracterizan como valores normales aquellos que se encuentran entre 10 y $200 \mu\text{g kg}^{-1}$.

Tabla 1: Valores medios de mercurio por Isla y tipo de muestreo.



	Nº	Islas Baleares	Islas Canarias	Total Media
Muestras		254	381	635
Suelo	318	61.11	33.18	44.16
Roca	317	11.07	9.12	9.91
Total	635	35.70	21.31	27.07

Tabla 2: Resumen estadístico del contenido de mercurio (en $\mu\text{g kg}^{-1}$).

	Baleares Roca	Baleares Suelo	Canarias Roca	Canarias Suelo
Nº de muestras	129	125	188	193
Media	11.07	61.11	9.12	33.18
Mediana	5.65	39.09	6.58	20.39
Dev. Estándar	14.43	63.51	8.03	32.94
1 ^{er} Cuartil	3.74	28.29	4.35	12.13
3 ^{er} Cuartil	12.06	59.33	11.63	42.78
P 90	22.56	116.93	16.12	82.72
P 95	43.93	225.15	20.74	95.56
P 99	82.60	327.86	46.94	158.88

3.2. Análisis espacial: mapas de contenido en mercurio

En Geostatística los patrones espaciales son usualmente descritos en términos de disimilitud, entre observaciones, como una función de la distancia de separación. Este tipo de función representa lo que se denomina semivariograma, el cuál se utiliza para buscar el mejor ajuste y obtener los parámetros (Nugget, Sill y Range) necesarios para el Kriging.

La Tabla 3 recoge los parámetros de los semivariogramas, para el ajuste al modelo esférico anisotrópico. La relación Nugget/Sill es un criterio de clasificación de la dependencia espacial. Si esta relación es inferior al 25%, existe una fuerte dependencia espacial, entre 25% y 75% se considera una dependencia moderada (Guo *et al.*, 2001; Sun *et al.*, 2003). Usualmente, una fuerte dependencia espacial está atribuida a propiedades intrínsecas (material original del suelo) y una débil dependencia espacial se asocia a aspectos extrínsecos (como la contaminación) (Liu *et al.*, 2004). El efecto nugget representa el error experimental indetectable, dentro del mínimo espaciamiento entre los puntos de muestreo (Guo *et al.*, 2001). El valor del sill representa la variación total (Ersoy *et al.*, 2004) y el rango es considerado como la distancia a partir de la cual no se detecta dependencia espacial entre observaciones (Gallardo, 2003; Sun *et al.*, 2003). Este rango fue significativamente mayor en las Islas Baleares, que en las Canarias, y se puede atribuir al distinto proceso geológico acontecido en cada archipiélago. Por otro lado, el mayor rango observado para el contenido de mercurio en el suelo, que para el material original (notablemente superior en las Islas Baleares (84.5 km), se puede atribuir a los efectos del

incremento de mercurio en la capa superficial del suelo, procedente posiblemente de la contaminación atmosférica. (Véase figura 2)

Figura 2: Variogramas experimentales del contenido en mercurio en suelo y roca.

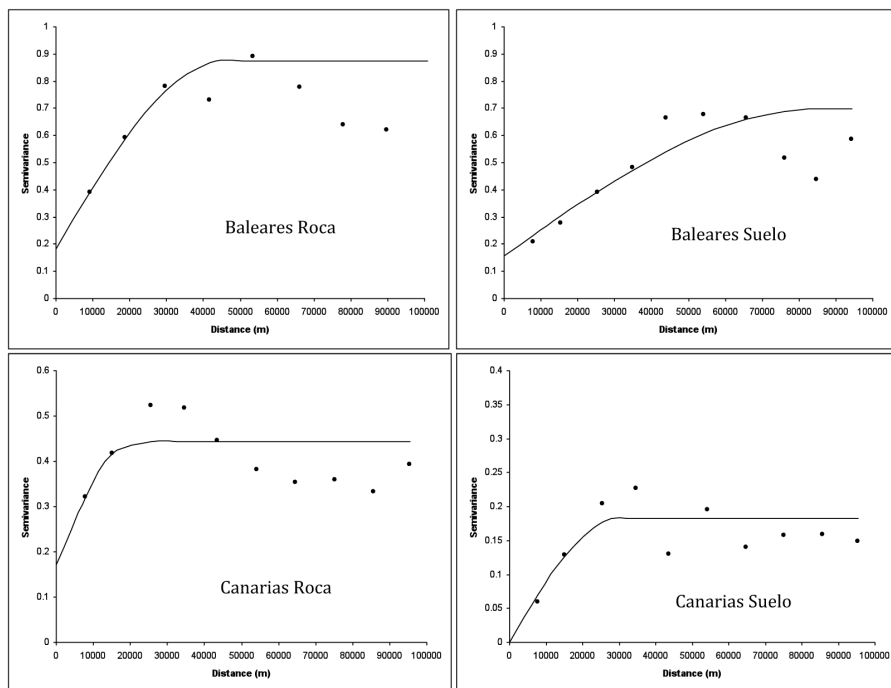
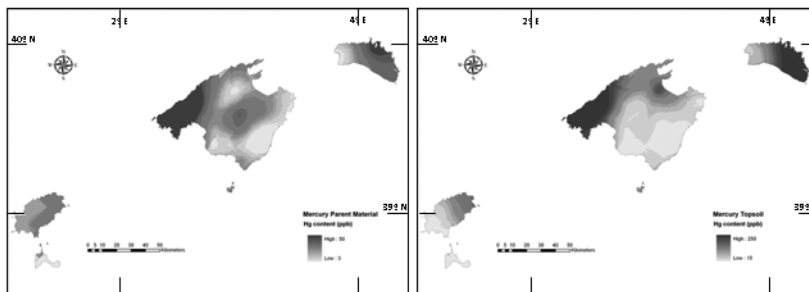


Tabla 3: Parámetros de ajuste de los semivariogramas (modelo esférico).

	Nugget (C_0)	Sill ($C_0 + C$)	Range (A_0)	Nugget/sill
Baleares suelo	0.157	0.698	84500	0.225
Baleares roca	0.181	0.875	45300	0.207
Canarias suelo	0.001	0.182	29800	0.005
Canarias roca	0.172	0.443	20600	0.388

La Figura 3, muestra el resultado del proceso del kriging ordinario para el contenido de mercurio en las Islas Baleares. Los grids o mapas raster obtenidos, se presentan como una aproximación de la concentración de mercurio tanto en el suelo, como en la roca madre. Estos mapas muestran distintas áreas (marcadas con un color más intenso) para niveles más altos de concentración. Los errores estándar estimados de los valores del Kriging, se utilizan para valorar la precisión del resultado de la interpolación. Estos errores reflejan la variabilidad del contenido en mercurio, a través de la desviación estándar de los valores originales (Guo *et al.*, 2001). Las medias de los errores estimados fueron tanto para el mercurio en el suelo, como para el correspondiente a la roca madre, menores que sus correspondientes desviaciones, indicando que la precisión de los resultados de la interpolación puede ser perfectamente aceptada.

Figura 3: Mapas de contenido en mercurio en las Islas Baleares

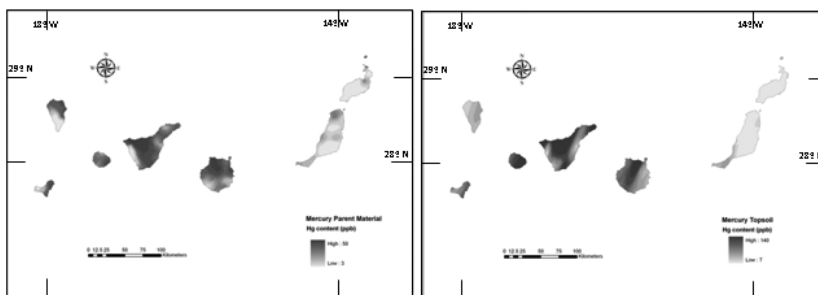


Las Islas Baleares presentan unas litologías principalmente calcáreas, que generan un pH más elevado como consecuencia de un mayor porcentaje de carbonatos. El mapa correspondiente al contenido de mercurio, obtenido a partir de los fragmentos rocosos, muestra una distribución espacial más uniforme (con un rango de 3 a 50 $\mu\text{g kg}^{-1}$), con valores más elevados en zonas del Noroeste de la isla de Mallorca y Norte de Menorca, pero que en ningún caso exceden de 50 $\mu\text{g kg}^{-1}$. Respecto al contenido en suelos (tierra fina de la capa superficial) el rango de valores es mucho mayor (de 15 a 250 $\mu\text{g kg}^{-1}$). Los contenidos más bajos se observan al sur de la isla de Mallorca, que destacan significativamente respecto al Norte de la isla, donde se llegan a alcanzar concentraciones superiores a 200 μg

kg⁻¹. El Este de la isla de Menorca, también presenta contenidos elevados en sus suelos.

En las Islas Canarias (Figura 4), la distribución espacial del contenido de mercurio en el suelo mostró, por lo general, una buena correlación con la estructura mineral de la zona. Los valores más altos de mercurio en suelo se han encontrado principalmente en Tenerife. Todo el Archipiélago canario es de origen volcánico, pero sólo en las dos islas centrales (Tenerife y Gran Canaria) se han dado condiciones favorables para que los magmas primarios evolucionen. El volcanismo predominante en Canarias se alimenta de magmas básicos alcalinos, que se generan en el manto superior. Las erupciones más recientes se remontan a la Edad Media, correspondientes al Teide (3718 m) en la Isla de Tenerife.

Figura 4: Mapas de contenido en mercurio en las Islas Canarias



El mapa obtenido del análisis de los fragmentos rocosos en las Islas Canarias muestra valores de concentración de mercurio entre 3 y 50 $\mu\text{g kg}^{-1}$, valores relativamente bajos para suelos volcánicos. Por otro lado, aunque las concentraciones de Hg se han visto enriquecidas en la capa superficial del suelo, éstas presentan valores mucho más bajos que los observados en las Islas Baleares.

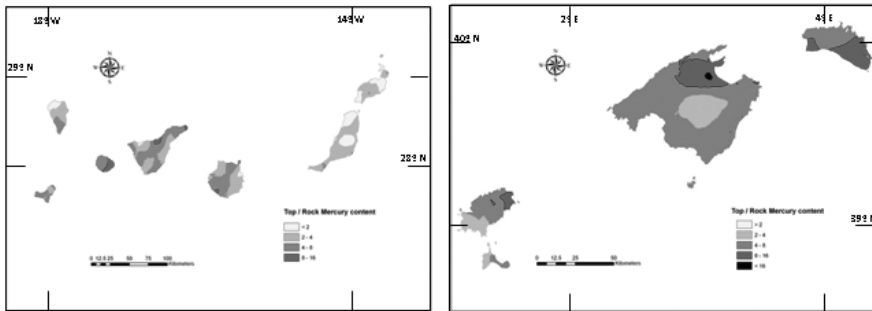
3.3. Relaciones espaciales: análisis de la relación Suelo/Roca.

La interpretación de mapas mostrados hasta ahora resulta valiosa a la hora de analizar cada estrato por separado. Aporta una idea de los niveles existentes, tanto en suelo, como el correspondiente al material original,

generando un mejor conocimiento de la distribución de estos espacialmente. Sin embargo, si lo que se busca es conocer las relaciones con el medio y los efectos de éste, o buscar impactos y repercusiones, es necesario valorar estas capas de información mediante SIGs a modo de matrices. La Figura 5 muestra la promoción de mercurio en suelo respecto al contenido en la roca, una operación sencilla en cualquier SIG.

Figura 4: Proporción de mercurio en suelos respecto al contenido en la roca madre

Figura 5: promoción de mercurio en suelo respecto al contenido en la roca, una operación sencilla en cualquier SIG

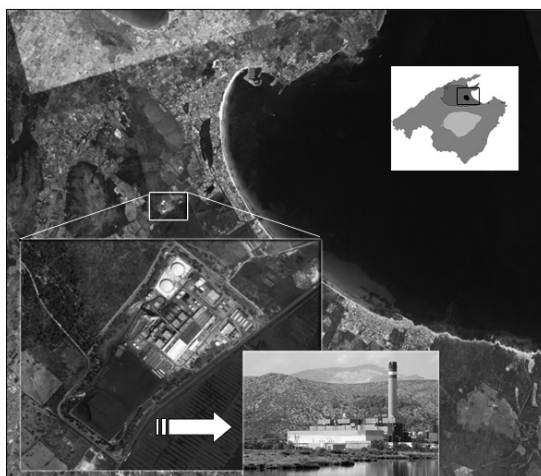


Los mapas obtenidos muestran en rojo y negro las zonas donde se multiplican por 8 y 16 el contenido de mercurio en suelo, respecto a concentración en la roca. En Canarias, la mayor parte de la superficie de las islas presenta valores en suelos de 2 a 4 veces superiores a los niveles valorados en la roca. Este enriquecimiento de la capa superficial del suelo no supone un aumento excesivo, y puede ser interpretado de forma natural por la capacidad que tienen los suelos de acumular metales en superficie, entre ellos, la asociación del mercurio a partículas de arcilla y a la materia orgánica. El incremento procedente de la contaminación difusa es derivado de actividades industriales, incineradoras de basura o la polución en general.

En la mayoría de los casos, las acumulaciones de mercurio esta asociadas con la deposición atmosférica (Engle *et al.*, 2005). Los posibles aportes antrópicos de mercurio al medio (Dreher y Follmer, 2004), incluyen las

emisiones procedentes de plantas eléctricas basadas en la quema de carbón, fundiciones, incineradoras de basura, cementeras, refinerías de petróleo, entre otras fuentes. En este sentido, las fuentes específicas de emisión de mercurio no eran objeto de ser determinadas en este trabajo. Sin embargo, se ha podido observar que las altas concentraciones encontradas en Mallorca están asociadas con una planta eléctrica de carbón (Figura 6), cuantificándose valores puntuales en el suelo, que superan en 16 veces el contenido en la roca.

Figura 6: Ubicación de la central eléctrica de Alcudia (Mallorca)



En la introducción se comentó que la mayor parte de las emisiones de mercurio son de origen antrópico, y cerca del 50% de este mercurio entra en el ciclo global (Liu *et al.*, 2003). Dreher y Follmer (2004) estimaron que entre el 70% y 80 % del mercurio emitido a la atmósfera es de origen antrópico. La mayoría de este mercurio se encuentra en forma de Hg^0 , el cuál es volátil y puede permanecer bastante tiempo en la atmósfera antes de ser depositado y alcanzar largas distancias. Sin embargo, el mercurio asociado a las partículas de ceniza y hollín puede ser fácilmente captado por la precipitación y depositada cerca de las fuentes de emisión. Lacerda *et al.* (2004) mostraron que la mayoría del mercurio emitido de la minería es depositado en los primeros 40 Km. Navarro *et al.* (1993) determinan

que el mercurio emitido por una papelera, en Motril (España), es depositado localmente y decrece según aumenta la distancia a la papelera. A este respecto, y refiriéndonos a los valores encontrados en la Isla de Mallorca, los mayores incrementos de mercurio en suelos, se encuentran en las cercanías de la central eléctrica de Alcudia (Figura 5), y el porcentaje de mercurio en suelo, respecto al de los fragmentos rocosos, se va reduciendo según se aumenta la distancia a la central eléctrica. Un estudio de la circulación atmosférica de la zona podría aportar una información valiosa a este respecto.

Centrándonos a nivel global en este archipiélago, las Islas Baleares presentan una proporción de mercurio en suelo mucho más alta que el archipiélago de las Canarias. La mayoría de la superficie de las Islas Baleares está entre 4 y 8 veces superior a los niveles de la roca. Aspecto que refleja, cómo las Islas Canarias tienen un menor aporte de mercurio, presumiblemente debido a una menor contribución de origen atmosférico.

4. Conclusiones

La utilización del SIG se ha mostrado como una herramienta de indudable valor a la hora de analizar la distribución de mercurio en el suelo y la relación con el material original. Siendo capaz de valorar áreas en las que el contenido de mercurio supera excesivamente las concentraciones en la roca de origen.

Los mapas generados con la relación de mercurio en suelo, respecto al mercurio en la roca, han permitido cuantificar las entradas de este metal al suelo. De acuerdo con los resultados, la concentración de mercurio en suelos depende, fundamentalmente, de la composición geoquímica del material original, lo que hace patente el control litogénico de la distribución espacial de este elemento. Si bien, el contenido en mercurio de la capa superficial del suelo, se ve enriquecido respecto a este origen. El enriquecimiento de mercurio en la capa superficial del suelo es inferior en las Islas Canarias que en el archipiélago Balear.

Este enriquecimiento de mercurio en suelos está relacionado con los procesos de deposición atmosférica. El SIG se muestra como una tecnología capaz de localizar fuentes de contaminación y proporcionar el alcance de los focos puntuales de contaminación. Los efectos de puntos de contaminación puntual, como la central eléctrica de Mallorca, se han hecho fácilmente

detectables con estos métodos. A pesar de esta influencia antrópica en determinadas zonas, la concentración de mercurio, se mueve dentro de lo que se puede considerar, rangos normales en suelos. La naturaleza calcárea de las Islas Baleares junto con un pH alcalino y una baja materia orgánica, típicos de las regiones mediterráneas, ayudan a minimizar los efectos de la carga de mercurio al suelo.

5. Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado por el Ministerio de Medio Ambiente y el Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación de España a través del convenio CC05-004: "Investigación del contenido de metales en suelos agrícolas de la Islas Baleares y Canarias". Los autores quieren agradecer la colaboración de los dos Ministerios.

6. Bibliografía

- Adriano, D.C. (1986). *Trace element in the terrestrial environment*, Springer-Verlang, New York.
- Alloway, B. J. (1995). *Heavy metals in soils*. Chapman & Hall. Glasgow, UK.
- Barazzuoli, P., Bouzelboudjen, M., Cucini, S., Kiraly, L., Menicori, P. & Salleolini, M. (1999). "Olocenic alluvial aquifer of the River Cornia coastal plain (Southern Tuscany, Italy) : database design for groundwater management". *In Environmental Geology* 39(2):123-143.
- Clark, I., (1979). *Practical geostatistics*. Scotland: Geostokos Limited.
- Dreher, G.B. & Follmer, L.R. (2004). Mercury content of Illinois Soils. *Water Air Soil Pollut.* 156, 299-315.
- Engle M.A., Gustin M.S., Lindberg A.W., and Ariya P.A. (2005). "The influence of ozone on atmospheric emissions of gaseous elemental mercury and relative gaseous mercury from substrates". *In Atmospheric Environment* 39: 7506-7517
- Ersoy, A., Yunsel, T. Y., Cetin, M., (2004). "Characterization of land contaminated by heavy metal mining using geostatistical methods". *In Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 46, 162-175.

- Gallardo A., (2003). "Spatial variability of soil properties in a floodplain forest in northwest Spain". In *Ecosystems* 6, 564-576.
- Guo, X., Fu, B., Ma, K., Chen, L., and Wang, J., (2001). Spatio-temporal variability of soil nutrients in the Zunhua plain, northern China. In *Physical Geography* 22, 343-360.
- Goovaerts, P., (1997). Geostatistics for natural resources evaluation. Applied geostatistics series. Oxford University New York Press.
- Goovaerts, P., (1998). "Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties". In *Biology and Fertility of Soils* 27, 315-334.
- Goovaerts, P., (1999). "Geostatistical in soil science: state-of-the-art and perspectives". In *Geoderma* 89, 1-45
- Cressie, N. A. C., (1991). *Statistics for Spatial Data*. John Wiley, New York.
- Hoobbs, R. J. & Atkins, L. (1988). "Spatial variability of experimental fires in south-west Western Australia". In *Australian Journal of Ecology* 13: 295-299.
- International Organization for Standardization. (1995). ISO 11466. Soil quality: extraction of trace elements soluble in aqua regia. ISO, Geneva.
- Ishida, T. & Ando, H., (1999). "Use of disjunctive cokriging to estimate soil organic matter from Landsat Thematic Mapper image". In *Int. J. Remote Sensing* 20, 1549-1565.
- Johnston, K., Ver Hoef, J. M., Krivoruchko, K. & Lucas, N. (2001). Using ArcGIS Geostatistical Analyst. GIS by ESRI. New York. 300pp.
- Journel, A. G., & Huijbregts, C. J., (1978). Mining Geostatistics, Academic Press, New York, 600 p.
- Juang, K. W., Chen, Y. S. & Lee, D.Y. (2004). "Using sequential indicator simulation to asses the uncertainty of delineating heavy-metal contaminated soil". In *Environmental Pollution* 127, 229-238.
- Kanevski, M. & Maignan, M., (2004). *Analysis and modelling of spatial environmental data*. Basel: Marcel Dekker EPFL press.
- Krajewski, S.A. & Gibbs, B.L. (1993). A Variogram Primer, Gibbs Associates, 93p.

- Lacerda, L.D., Souza, M. & Ribeiro, M.G. (2004). "The effects of land use change on mercury distribution in soils of Alta Floresta, Southern Amazon". In *Environ Pollut.* 129, 247-255.
- Lin, Y. P. (2002). "Multivariate geostatistical methods to identify and map spatial variations of soil heavy metals". In *Environmental Geology* 42. 1-10
- Liu, X., Xu, J., Zhang, M. & Zhou, B., (2004). "Effects of land management change on spatial variability of organic matter and nutrients in paddy field: A case study of Pinghu, China". In *Environmental Management* 34, 691-700.
- Liu, R., Wang, Q., Lu, X., Fang, F. & Wang, Y. (2003). "Distribution and speciation of mercury in the peat bog of Xiaoxing'an Mountain, northeastern China". In *Environ Pollut.* 124, 39-46.
- López, M., y Rodríguez, J.A. (2005). Metales pesados, materia orgánica y otras características de la capa superficial de los suelos agrícolas y de pastos de España peninsular. *I resultados globales*. Ed. Instituto nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Ministerio de Educación y Ciencia. Madrid.
- Mark, O.B. & Ralph, R.T. (2001). "Bioaccessibility of mercury in soil". In *Soil Sediment Contam.* 10, 301 – 316.
- Menezes, Z., Marques, J. & Tadeu, G. (2004). "Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e materia organica em solos de relevos diferentes". In *Pesq. Agropec. Bras.* V.39. Nº5: 491-499.
- Navarro, M., López, H., Sánchez, M. & López, M. (1993). "The effect of industrial pollution on mercury levels in water, soil, and sludge in the coastal area of Motril, Southeast Spain". In *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 24, 11-15.
- Oberthür, Goovaerts P., & Doberman A. (1999). "Mapping soil texture classes using field texturing, particle size distribution and local knowledge by both conventional and geostatistical methods". In *European Journal of Soil Science* 50, 457-479.
- Peña, J. (2006). Sistemas de información geográfica aplicados a la gestión del territorio. Alicante. Ed. ECU.
- Phillips, D. L., Dolph, J. & Marks, D. (1992). "A comparison of geostatistical procedures for spatial analysis of precipitation in mountainous terrais". In *Agricultural and Forest Meteorology* 58: 119-141.

- Rodríguez, J.A.; Vázquez, A., Grau, J.M., Martínez, A., & López, M. (2009). "Factors controlling the spatial variability of mercury distribution in Spanish topsoil". In *Soil and Sediment Contamination: An International Journal* 18, 30-42.
- Rodríguez, J.A.; López, M. & Grau, J. M. (2009). "Mercury content in topsoils, and geostatistical methods to identify anthropogenic input in the Ebro basin (Spain)". In *Spanish Journal of Agricultural Research* 7, 155-166.
- Rodríguez, J.A., Nanos, N.; Grau, J.M.; Gil, L. & López, M. (2008). "Multi-scale analysis of heavy metal contents in spanish agricultural topsoils". In *Chemosphere* 70, 1085-1096.
- Rodríguez, J.A.; Vázquez, A., Grau, J.M., & López, M. (2007). "Factors controlling the spatial variability of copper distribution in topsoils of the North-eastern region of the Iberian Peninsula, Spain". In *Water, Air, & Soil Pollution* 186, 311-321.
- Sun, B., Shenglu, Z., & Zhao, Q. (2003). "Evaluation of temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China". In *Geoderma* 115, 85-99.
- Tack, F.M.G., Vanhaesebroek, T., Verlo, M.G., Rompaey, K.V. and Ranst, E.V. (2005). "Mercury baseline levels in Flemish soil (Belgium)". In *Environ. Pollut.* 134, 173-179.
- Yemefack, M., Rossiter, D. G. and Njomgang, R., (2005). "Multi-scale characterization of soil variability within an agricultural landscape mosaic system in southern Cameroon". In *Geoderma* 125, 117-143.