

EVALUACIÓN DEL RIESGO AMBIENTAL POR LA PRESENCIA DE MERCURIO EN RELAVES MINEROS DENTRO DE LA CIUDAD DE ANDACOLLO, CHILE

EVALUATION OF THE ENVIRONMENTAL RISK FOR THE PRESENCE OF MERCURY IN MINING TAILING INSIDE THE CITY OF ANDACOLLO, CHILE

**Ricardo A. Zamarreño^{1,2}, Paulina N. Gonzalez¹, Erika X. Hanshing¹,
Gabriel A. Amar¹, Clotilde M. Pizarro²**

(1) Universidad Pedro de Valdivia, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil, Sede La Serena,
Campus 4 Esquinas, La Serena - Chile

(2) Universidad de La Serena, Facultad de Ciencias, Departamento de Química, Colina El Pino, La Serena - Chile
(e-mail: ricardo.zamarreno.doc@upv.cl, rzmarre@userena.cl)

Recibido: 25/07/2013 - Evaluado: 25/09/2013 - Aceptado: 04/11/2013

RESUMEN

El presente trabajo presenta la metodología para calcular la concentración de mercurio que se volatiliza hacia la atmósfera de la ciudad de Andacollo, que se encuentra presente en las tortas de relave que están dentro de la ciudad. Para calcular la cantidad de mercurio que se volatiliza, se empleó la ecuación de Penman-Monteith modificada, aplicando las variables termodinámicas para el mercurio y la climatología del sector. Se predice la distribución de este elemento en la atmósfera de la ciudad de Andacollo con la aplicación del programa Screen 3. Se pudo determinar que dentro de la ciudad de Andacollo pueden existir zonas con alta concentración de mercurio, los cuales pueden afectar la salud de la población.

ABSTRACT

The present work presents the methodology to calculate the concentration of mercury that it is volatilized toward the atmosphere of the city of Andacollo present in the tailings cakes that are inside the city. To calculate the amount of mercury which is volatilized, we used the Penman-Monteith equation modified by applying the thermodynamic variables for mercury and sector climate. The distribution of this element is predicted in the atmosphere of the city of Andacollo with the application of the program Screen 3. It was determined that within the city of Andacollo may exist areas with high concentrations of mercury, which can affect the population's health.

Palabras clave: relaves mineros; riesgos químicos; mercurio; modelos ambientales

Keywords: tailing miners; chemical risks; mercury; environmental models

INTRODUCCIÓN

En términos generales, riesgo es la probabilidad de que ocurra un hecho que puede ser perjudicial para la salud o la estructura física de las personas. Esto se relaciona con el concepto de exposición a un peligro. La exposición a un peligro puede ser voluntaria, pero también existe la exposición involuntaria a un peligro, como lo es, por ejemplo, la exposición a sustancias tóxicas presentes en el medio ambiente, pudiendo provocar efectos negativos de una exposición de este tipo dependiendo de la toxicidad de la sustancia, de la dosis y del tiempo y frecuencia de la exposición (SEMARNAT, 2003).

En los países europeos existe una preocupación especial por la evolución de los riesgos que presenta la población por la presencia de contaminantes en el medio (Poggio *et al.*, 2008).

En España se evaluó el riesgo que produce la presencia de metales pesados, dioxinas y benzofuranos en la población de la localidad de Castelloni, pudiendo determinar que la población está expuesta a estos compuestos, con una alta probabilidad de producir enfermedades respiratorias y cancerígenas (Mari *et al.*, 2009).

Se ha estudiado la presencia de metales pesados como el As, Hg y Cd en ciudades mineras españolas, encontrando altos niveles de estos elementos en muestras biológicas de la población que reside cerca del área de influencia de la minera Aznalcollar, comparado con la población alejada de la minera (Gil *et al.*, 2006).

La concentración de Hg en poblaciones aledañas a un incinerador de residuos sólidos en Portugal, se determinó su peligrosidad encontrando altas concentraciones en muestras de sangre aumentando la probabilidad de producir enfermedades asociadas a este elemento (Reis *et al.*, 2007)

Para evaluar el riesgo potencial que ocurra una exposición cuando una sustancia entra en contacto con el organismo humano, es necesario medir y el concepto de dosis del sustancia que ingresa y la respuesta que presenta el organismo, el cual puede permitir obtener una relación matemática entre la cantidad de sustancia tóxica a la cual un ser humano está expuesto y el riesgo de desarrollar una respuesta negativa a esa dosis, (WHO, 2010).

Los compuestos químicos tóxicos son los que generalmente inducen efectos a través de mecanismos fisiológicos y metabólicos distintos, lo cual se ve reflejado en la forma que adquiere la relación dosis-respuesta. Teniendo presente estas consideraciones se pueden dividir a los compuestos tóxicos en dos categorías generales:

- Compuestos tóxicos con umbral o punto a partir del cual se observa un efecto.
- Compuestos tóxicos sin umbral o sin un punto claro donde inicie un efecto (Ministerio del Trabajo e Inmigración, 2010).

La toxicidad es la capacidad que tienen algunas sustancias para provocar daños en los organismos vivos, cuando tienen una posibilidad escasa de producir un daño grave, se denomina sustancias nocivas, y cuando la posibilidad es alta y los daños son graves se conocen como sustancias tóxicos (WHO, 2010).

Hay una gran variedad de sustancias nocivas y tóxicas, entre las cuales podemos nombrar a los Irritantes que producen inflamación de la mucosa, asfixiantes, estas impide la llegada del oxígeno a los tejidos, evitando la oxidación de las células, narcóticos son depresores del sistema nervioso central que producen somnolencia y pérdida de reflejos y del conocimiento, cancerígenos potencian la formación de cánceres, muta génicos alteran el material genético de las células, teratógenos producen alteraciones en el feto durante el desarrollo uterino, (González, 2012).

El uso de mercurio es tan amplio que se utiliza en la fabricación de las amalgamas dentales (Jairo *et al.*, 2008) evaluó la concentración de mercurio en Clínicas dentales de la ciudad de Antioquía, concluyendo que la presencia de este elemento provoca un importante riesgo para los trabajadores de los policlínicos y sus pacientes.

García *et al.* (2006), estudiaron la mortalidad por enfermedades genitourinarias en los mineros de los yacimientos de mercurio en España, pudiendo encontrar una relación entre el tiempo de permanencia del trabajador en los yacimientos mineros y con estas enfermedades.

Para la evaluación de los distintos riesgos asociados a componentes químicos y biológicos existen distintas metodologías que se detallan en algunos trabajos realizados por investigadores. En Corea, se evaluó la concentración de metales pesados en las vecindades de una mina de oro y plata abandonadas, evaluando el riesgo para la salud, utilizando cuatro etapas, la primera es la identificación del peligro, la segunda etapa es la evaluación de la toxicidad, (dosis respuesta), el tercer paso es la exposición y por último la caracterización del riesgo asociado al contaminante (Lim *et al.*, 2008).

Zheng *et al.* (2010), determinaron el riesgo que sufre la población de la ciudad industrial de Huludao, ubicada al norte de China, por la presencia de metales pesados en el polvo en suspensión urbano, entre los que se encontraba el mercurio, utilizando la metodología descrita por Lim *et al.* (2008). Determinando que uno de los principales riesgos era el ingreso de mercurio por la vía respiratoria.

Según Higuera *et al.* (2004), la Región de Coquimbo (Chile) presenta localidades fuertemente de carácter minero, en estas localidades se midió la concentración de algunos metales en suelo y en sedimentos, en los cuales se encuentran el mercurio y la localidad de Andacollo, detectando que la concentración de mercurio en suelos de esta ciudad varía entre 2,4 a 47 µg/g.

Para esta propuesta de evaluación del riesgo ambiental, por la presencia de mercurio en relaves mineros, se tomaron los resultados del estudio realizado por el Ministerio del Medio Ambiente (2009), donde evaluaron la concentración de mercurio en los relaves que están presentes dentro de la ciudad de Andacollo.

Para el desarrollo matemático se aplicó la ecuación de Penman-Monteith (FAO, 2006), modificada para el mercurio, considerando las variables termodinámicas del mercurio y las climatológicas de la ciudad de Andacollo, (www.sivica.cl).

La ecuación de Penman-Monteith, se aplica para el proceso de evapotranspiración que sufren los terrenos-cultivos, considerando las variables ambientales y las termodinámicas del agua.

$$E_t = \frac{\Delta(Rn - G) + \rho a C_p (e_s - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (1)$$

Donde R_n es la radiación neta, G es el flujo del calor en el suelo, $(e_s - e_a)$ representa el déficit de presión de vapor del aire, ρa es la densidad media del aire a presión constante, c_p es el calor específico del aire, Δ representa la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación, γ es la constante psicométrica, r_s y r_a son las resistencias superficial (total) y aerodinámica.

Las variables que se encuentran en la ecuación (1), son en su mayoría climatológicas y termodinámicas para el agua. El mercurio es un metal líquido y tiene propiedades termodinámicas que se pueden a dicha ecuación, determinando la evaporación que sufre el mercurio que se encuentra presente en los relaves mineros de la ciudad de Andacollo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el presente estudio se consideraron los relaves que se encuentran presente dentro de la ciudad de Andacollo, como lo muestra la Figura 1.



Fig. 1: Se presentan los principales sitios (s) donde se encuentran los relaves presentes en la ciudad de Andacollo y los puntos de análisis de la presencia de mercurio, (Fuente: Google Earth, 2012).

Para la determinación de la cantidad de materia que se encontraba en cada torta de relave se procedió a medir el área, la altura y la densidad de cada torta.

La medición del área de cada torta fue realizada mediante el uso del programa Google Earth. Con este programa se pueden detectar específicamente los puntos en estudio y así mismo medir el contorno de estos para obtener las áreas que ocupan cada relave en la ciudad, se complementó esta medición aplicando el programa AutoCAD.

Para conocer la altura de cada una de las tortas de relave, se realizó una visita a terreno, donde se midió la altura aproximada de las tortas presentes y estudiadas, las cuales fueron medidas a través del Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System-GPS) y un estadal de aluminio (regla topográfica).

Con las tortas medidas se obtuvo un promedio de cada una de ellas, el cual por la similitud de las alturas de las tortas se utilizó como constante.

Para la determinación de los volúmenes, se obtuvo a través de los datos anteriores de área y altura.

De las muestras de las tortas de relave, se procedió a determinar la densidad de cada una de ellas a través del método de la variación de volumen cuando ellas fueron vertidas en una probeta que contenían un volumen de agua. Obteniendo las densidades y los volúmenes se puede calcular la cantidad de masa que está presente en cada relave estudiado.

Con estos resultados y los datos encontrados en el estudio realizado por el Ministerio de Medio Ambiente (2009), se pudo obtener la concentración y la cantidad total de mercurio que está presente en cada relave.

Posteriormente estos resultados obtenidos se introducen en la fórmula de Penman – Monteith modificada, para determinar la cantidad de mercurio que se puede evaporar según las características climatológicas de la ciudad de Andacollo.

En la etapa siguiente, estos datos se ingresan y analizan en el programa SCREEN 3 que determina la posible concentración de mercurio en la atmósfera de la ciudad de Andacollo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se entrega la concentración promedio de mercurio que se encontró en el estudio realizado por el Ministerio del Medio Ambiente en el año 2009. En la Figura 2 se presentan estos resultados en forma gráfica.

En la Tabla 2, se presentan los resultados de las mediciones realizadas a las tortas de relave analizadas con la concentración y cantidad total de mercurio que está presente en cada una de ellas.

Tabla 1: Concentración de mercurio en los relaves presentes en la ciudad de Andacollo, (Fuente: Ministerio del Medio Ambiente, 2009).

Sector	Prom Hg (mg/kg)	Desv. Estan. Mg/Kg
1	1,37	0,29
2	13,07	1,72
3	3,73	2,6
4	2,36	2,37
5	0,48	0,26
6	3,4	4,69
7	2,33	4,88
8	1,97	2,09
9	0,36	0,1
10	7,59	7,14
11	5,33	6,93
13	3,78	4
18	3,04	1,45

Tabla 2: Se presentan los resultados obtenidos en la determinación de la cantidad de masa que tiene cada relave, la concentración de mercurio y la cantidad total de mercurio presente.

Sitio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	18	Prom
Volúmen m³	5.682	3.517,6	8.678	9.900	5.175	11.462,2	6.247,4	6.637	3.295	4.921,8	9.298	10.051	19.967	8064
Densidad Kg/m³	3,3	2,9	2,7	2,9	3,1	2,9	2,8	2,9	3	3	2,9	2,7	2,6	2,9
Masa de relave Ton	18,75	10,20	23,14	28,50	16,04	33,24	17,49	19,24	9,90	14,77	26,96	27,14	51,91	22,87
Hg mg/Kg	1,37	13,07	3,73	2,36	0,48	3,40	2,33	1,97	0,36	7,59	5,33	3,78	3,04	3,75
Masa de Hg (g)	25,69	133,33	86,33	67,26	7,70	113,02	40,76	37,92	3,56	112,07	143,72	102,58	157,82	85,86

Tabla 3: Concentración de mercurio en la atmósfera predicho por el programa SCREEN 3 emanados por los relaves presentes en la ciudad de Andacollo.

Relave	Distancia (m)	(ug/m3) Hg	Altura (m)	Pluma (m)
Sitio 1	10	379,9	20	0
	105	1,18x10 ⁵	20	1
Sitio 2	10	6.432	20	24
	72	7,79x10 ⁴	20	0
Sitio 3	10	5.285	20	0
	107	1,79x10 ⁵	20	0
Sitio 4	10	9.945	20	0
	108	2,02x10 ⁵	20	0
Sitio 5	10	164	20	0
	104	1,06x10 ⁵	20	0
Sitio 6	10	1,89x10 ⁴	20	0
	109	2,33x10 ⁵	20	0
Sitio 7	10	766	20	0
	105	1,31x10 ⁵	20	0
Sitio 8	10	1.152	20	0
	105	1,39x10 ⁵	20	0
Sitio 9	10	3.929	20	28
	72	7,34x10 ⁴	20	0
Sitio 10	10	120	20	0
	104	1,05x10 ⁵	20	0
Sitio 11	10	7.397	20	0
	107	1,91x10 ⁵	20	0
Sitio 13	10	1,09x10 ⁴	20	0
	108	2,06x10 ⁵	20	0
Sitio 18	10	9,56x10 ⁴	20	0
	120	3,74x10 ⁵	20	0

Al analizar la Tabla 2, se observa que la mayor concentración de mercurio está en el relave número 2, pero la mayor cantidad de este elemento está en el relave número 18, pero su concentración es baja, esto se debe a que este relave tiene la mayor cantidad de masa. La densidad de los distintos relaves varía entre 2,8 y 3,3, Kg/m³, teniendo un promedio de 2,9 Kg/m³.

En la Tabla 3 se presentan los resultados entregados por el programa SCREEN 3, donde predice las concentraciones máximas y mínimas de mercurio que ingresan hacia la atmósfera de la ciudad de Andacollo por evaporación de este elemento, con sus respectivas distancias considerando el centro de cada relave. Se puede observar en la Tabla, que la concentración máxima a mayor distancia se produce en el relave 18 con una

concentración de $3,74 \times 10^5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a una distancia de 120 m del relave. La mayor concentración a la menor distancia se produce en el relave 4, con una concentración de $9945 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a una distancia de 10 m desde el relave. La menor concentración a una mayor distancia se produce en el punto 2, con una concentración de $7,79 \times 10^4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a una distancia de 72 m. La menor concentración de mercurio en la atmósfera que emite la torta 10 con una concentración de $119,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a una distancia de 10 m.

Es importante hacer notar que el programa predice que solamente los relaves 2 y 9 presentan una pluma de dispersión de 24 y 29 m respectivamente, ya que estos relaves son los que presentan las mayores alturas, pero en el resto de las tortas la dispersión no presentan plumas, lo que estaría indicando que esta dispersión se desarrollan a nivel del suelo, donde puede existir un mayor contacto entre el mercurio atmosférico y los habitantes de la ciudad de Andacollo.

Los resultados obtenidos, en esta investigación concuerdan con un estudio similar realizado en la ciudad de México, donde se evaluó la concentración de mercurio que se emitía desde los vertederos de residuos municipales (Rosa *et al.*, 2004).

En la Figura 3, se presenta las interacciones que se producen en las distintas emanaciones predichas por el programa SCREEN 3, considerando las variables climatológicas como son el viento predominante y la humedad ambiental.

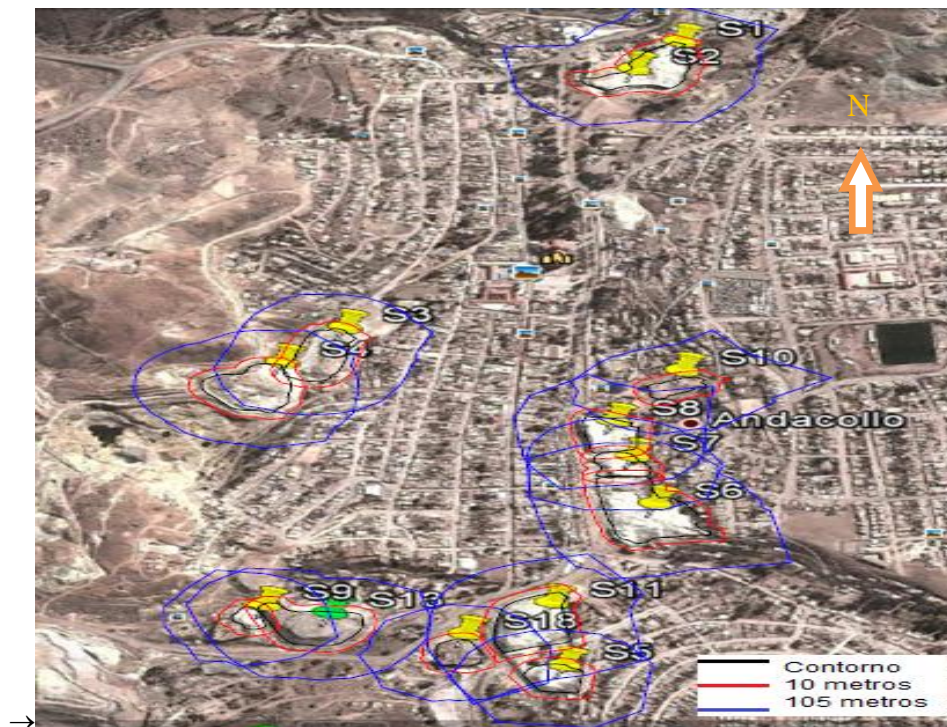


Fig. 3: Dispersión del Hg que ingresa a la atmosfera de la ciudad de Andacollo, debido a la presencia de las tortas de relave, predichas por el programa SCREEN 3.

Al observar la Figura 3, se puede deducir que existen tres zonas donde se puede concentrar el vapor de mercurio en la ciudad de Andacollo, la primera está compuesta con las tartas S1 y S2, ubicadas el norte de la ciudad, donde el impacto en los habitantes sería baja, ya que la densidad poblacional es baja. El segundo grupo estaría constituido por los relaves S3 y S4, que se encuentran al oeste de la ciudad, donde el modelo predice

que se superponen las emisiones de mercurio hacia la atmósfera, aumentando su concentración, el cual puede afectar a una parte importante de la población, por su cercanía a poblaciones de la ciudad.

Por último se tiene el grupo más importante, compuesto por los relaves S5, S6, S7, S8, S9, S10, S11, S13 y S18, los cuales abarcan una importante superficie dentro de la ciudad, ubicándose en la zona sur-oeste de la ciudad de Andacollo, donde el modelo predice la superposición de dos hasta tres emisiones de mercurio que son emitidos por estos relaves, lo que provocaría un importante aumento de la concentración de mercurio en la atmósfera de estas zonas, provocando que un importante porcentaje de la población este expuesto a este elemento, ya que este sector está rodeado por sectores residenciales.

En la Figura 3 se puede apreciar que el segundo y el tercer grupo de relaves rodean a una amplia zona residencial dejando expuesto a sus habitantes a la presencia de mercurio atmosférico.

CONCLUSIONES

De acuerdo con el análisis de los resultados, se puede inferir que:

- ✓ La ciudad de Andacollo presenta una importante cantidad de relaves mineros de la pequeña minería del oro, el cual contiene importantes concentraciones de mercurio.
- ✓ Para poder determinar la cantidad de mercurio que se emite a la atmósfera se empleó la ecuación de Penman – Monteith, utilizando las variables físicas, químicas y termodinámicas del mercurio, obteniendo una buena aproximación de la evaporación del mercurio desde los relaves.
- ✓ Los resultados obtenidos son semejantes al estudio realizado en la ciudad de México (Rosa *et al.*, 2004), donde se determinó la concentración del mercurio en la atmósfera que se emanaba desde vertederos municipales en la ciudad de México.
- ✓ Según los resultados entregados por el programa SCREEN 3, existe un importante porcentaje de la población de la ciudad de Andacollo, que estaría en contacto con el mercurio que sería emitido por estas tortas, lo que podría generar problemas de salud pública.
- ✓ El paso siguiente de este estudio es validar los resultados obtenidos, a través de las mediciones en terreno de la concentración de mercurio en la atmósfera de la ciudad de Andacollo y comprobar la presencia de efectos nocivos en la salud de la población por la presencia de este elemento en su ambiente.

AGRADECIMIENTOS

A la Vice rectoría de Investigación y Desarrollo de la Universidad Pedro de Valdivia por su financiamiento en este proyecto. Al señor Daniel Arias, Director de la Escuela de Ingeniería sede La Serena, de la Universidad Pedro de Valdivia, por su apoyo y compromiso con este proyecto.

REFERENCIAS

1. FAO-Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (2006). Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO, riego y drenaje 56, Roma, Italia, pp. 17-25, 35-50, 53-60.
2. García Gómez, M., Boffetta, P., Caballero Klink, K. & Gómez Quintana, J. (2006). Mortalidad por enfermedades genitourinarias en los mineros de mercurio. *Actas Urológicas Españolas*, 30 (9), 913-920.

3. Gil, F., Capitán, L., De Santiago, E. & Ballesta, J. (2006). Heavy metal concentrations in the general population of Andalusia, South of Spain A comparison with the population within the area of influence of Aznalcóllar mine spill (SW Spain). *Science of the Total Environment*, 372, 49-57.
4. Gonzalez, P. (2012). "Emanación de mercurio hacia la atmósfera de la comuna de Andacollo, por la presencia de tortas de relaves provocados por la minería del oro". Tesis de Título de Ingeniería Civil Industrial. Universidad Pedro de Valdivia.
5. Higuera, P., Oyarzun, R., Oyarzun, J., Maturana, H., Lillo, J. & Morata, D. (2004). Environmental assessment of copper-gold-mercury mining in the Andacollo and Punitaqui districts, northern Chile. *Applied Geochemistry*, 19, 1855-1864
6. Jairo, A., Ruiz, C., Durán, J., Villa, M., Zapata, A. & Carmona, R. (2008). Contribución de las condiciones locativas y ambientales al riesgo de contaminación con mercurio en las entidades odontológicas de Antioquia. *Rev. Fac. Nac. Salud Pública*, 26, 164-168.
7. Lim, H., Lee, J., Chon, K. & Sager, M. (2008). Heavy metal contamination and health risk assessment in the vicinity of the abandoned Songcheon Au-Ag mine in Korea. *Journal of Geochemical Exploration* 96, 223-230.
8. Ministerio del Trabajo e Inmigración (2010). "Riesgo químico. Sistema para la evaluación higiénica". Editorial Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, España.
9. Ministerio del Medio Ambiente (2009). "Compendio de resultados experimentales de la presencia de mercurio en la comuna de Andacollo". Santiago de Chile.
10. Mari, M., Nadal, M., Schuhmacher, M. & Domingo, J. (2009). Exposure to heavy metals and PCDD/Fs by the population living in the vicinity of a hazardous waste landfill in Catalonia, Spain: Health risk assessment. *Environment International* 35, 1034-1039.
11. Poggio, L., Borut, V., Hepperle, E., Schulin, R. & Ajmone, F. (2008). Introducing a method of human health risk evaluation for planning and soil quality management of heavy metal-polluted soils. An example from Grugliasco (Italy). *Landscape and Urban Planning*, 88, 64-72.
12. Rosa, D., Sepúlveda, T. & Solórzano, G. (2004). Emisiones de mercurio gaseoso total en sitios de disposición final de residuos sólidos municipales en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Actas de la 7ª Conferencia Internacional sobre mercurio como contaminante global. Ljubljana, Eslovenia.
13. Reis, F., Sampaio, C., Brantes, A. & Aniceto, P. (2007). Human exposure to heavy metals in the vicinity of Portuguese solid waste incinerators Part 1: Biomonitoring of Pb, Cd and Hg in blood of the general population. *Int. J. Hyg. Environ.-Health*, 210, 439-446.
14. SEMARNAT-Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2003). Introducción al Análisis de Riesgos ambientales. 11- 12. Instituto Nacional de Ecología, México.
15. WHO (2010). "Risk Assessment Toolkit Chemical Hazards". World Health Organization, Ottawa, Canada, pp. 2-3. http://libdoc.who.int/publications/2010/9789241548076_eng.pdf
16. Zheng, N., Liu, J., Wang, Q. & Liang, Z. (2010). Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in the zinc smelting district, Northeast of China. *Science of the Total Environment*, 408, 726-733.

