



Enriquecimiento y distribución espacial de arsénico en los suelos de las comunas de Quintero y Puchuncaví.

Nicolás Poblete*, Orlando Macari y Carlos Rodríguez

PGS Chile SpA, Eleodoro Flores 804, Santiago, Chile

** email: nicolas.poblete@pgschile.com*

Resumen. Por más de 50 años el Complejo Industrial Ventanas (CIV) ha emitido material particulado al aire, depositándose en los suelos de las comunas Quintero y Puchuncaví. Esto ha generado concentraciones altas de arsénico(As), y otros elementos, en el suelo. El percentil 95 de las concentraciones actuales, calculado sobre 466 muestras recolectadas mediante un muestreo sistemático estratificado, es tres veces mayor que el mismo percentil del fondo geoquímico, calculado en suelos similares a los estudiados, fuera de la zona de estudio. La interpolación espacial realizada con los datos obtenidos, mediante el método geoestadístico kriging, evidenció la existencia de concentraciones sobre 30 mg/kg en las inmediaciones del CIV. El enriquecimiento de As y las correlaciones con otros elementos permite concluir que las concentraciones anómalas, en ambas comunas, se pueden asociar a una fuente antrópica, en particular a la fundición de cobre de Ventanas. Al comparar con la norma canadiense, la mayor parte de la zona presentaría contaminación.

Palabras Claves: Complejo Industrial Ventanas, Puchuncaví, Quintero, contaminación, suelo, kriging.

1 Introducción

Tanto en Chile como en otros países que poseen una importante actividad minera, se pueden encontrar zonas con presencia de altas concentraciones de elementos traza. En este sentido, las fuentes de estos elementos podrían ser acopios de material estéril o concentrado de cobre, botaderos producidos por la explotación de yacimientos, y las emisiones originadas en fundiciones, como anhídrido sulfuroso (SO₂) y material particulado (Basta y Grandwohl, 2000; Ibáñez, 1993).

El contenido promedio de As en la corteza terrestre es de 1.8 mg/kg, y en los suelos se estima en 6.83 mg/kg, en un rango que varía entre <0.1 y 67 mg/kg, donde los valores más altos se asocian a suelos orgánicos (Histosoles). Este elemento se encuentra en forma abundante en sedimentos arcillosos, sobre los 13 mg/kg, encontrándose fuertemente asociado a depósitos de varios metales y metaloides, por lo que es utilizado como indicador en prospecciones geoquímicas. El mineral de As más común es la arsenopirita (FeAsS), el cual es común en formaciones sedimentarias ricas en materia orgánica, especialmente esquisto, carbón y turberas. Existe un gran número de minerales de As, de los cuales aproximadamente el 60 % corresponde a arseniatos (Kabata-Pendias, 2011).

Los minerales y compuestos de As son muy solubles, pero este elemento puede ser fácilmente adsorbido a minerales de arcilla, hidróxidos y materia orgánica del suelo, así como también a minerales de Fe y Mn (Kabata-Pendias, 2011; Gough et al., 2006).

Existen fuentes antrópicas significativas de As asociadas a actividades industriales, tales como el procesamiento de metales, combustión de carbón, procesos químicos de minerales de fósforo y azufre, entre otros. En este sentido, se han observado suelos de jardines contaminados con altas concentraciones de As (sobre 200 mg/kg) en las inmediaciones de antiguas fundiciones (Vangronsveld, 1998).

1.2 Zona de estudio

El área de estudio comprende las Comunas de Quintero y Puchuncaví, en la Región de Valparaíso, Chile, abarcando un área total de 450 km² aproximadamente. Esta superficie se encuentra dentro de la zona conocida como mediterránea árida, comprendida entre los 32°00' S hasta los 37°45' S. El relieve quedó definido durante el Cuaternario, comprendiendo los cerros de la Cordillera de la Costa, y los lomajes y terrazas costeras, incluyendo planicies litorales y las terrazas marinas (Luzio et al., 2010).

La geología de la zona se caracteriza principalmente por rocas volcánicas del Jurásico y rocas intrusivas del Paleozoico al Jurásico. Además se pueden encontrar areniscas, en los acantilados entre Maitencillo y Horcón. Los depósitos poco consolidados corresponden principalmente a depósitos eólicos antiguos (Rivano et al., 1993).

El CIV se encuentra emplazado entre las Comunas de Quintero y Puchuncaví, en una zona costera ubicada a 150 km al Noroeste de Santiago y a 40 km de Viña del Mar. Este complejo, creado en 1958, alberga a 14 empresas, entre ellas la Fundición Ventanas, actualmente de CODELCO, la cual entró en operaciones el año 1964; su refinería electrolítica y planta de metales Nobles comenzaron a operar en 1966 (Ibáñez, 1993). Posterior a la instalación de la fundición y refinería, en el año 1992, el Ministerio de Minería promulga el decreto supremo N°252, correspondiente al Plan de descontaminación de Ventanas, con el fin de disminuir las emisiones de CHILGENER S.A., actual AES GENER y de la Fundición

y Refinería Ventanas (Cámara de Diputados, 2011).

Se estima que la cantidad de As liberado a la atmósfera por el proceso de fundición en Ventanas es del orden de 60 ton/año y de material particulado MP₁₀ de 130 ton/año (CODELCO, 2015). Estas cifras corresponden a las emisiones alcanzadas posterior a la plan de descontaminación de Ventanas, ya que en el año 1993 se estimaba que el arsénico liberado era 1.5 ton/día (Ibáñez, 1993).

2 Metodología

2.1 Recolección, preparación de muestras y análisis químico

La recolección de muestras de suelos se hizo entre 0-15 cm de profundidad, mediante uso de palas plásticas, siendo almacenadas en bolsas de polietileno con cierre hermético. Las muestras extraídas fueron compuestas, a partir de 5 sub-muestras recolectadas en un área de 1m². Posteriormente, las muestras compuestas fueron enviadas al Laboratorio Actlabs en Coquimbo, donde fueron tamizadas en una malla de 180 µm, para luego determinar su composición química en un ICP-MS.

Los puntos de muestreo fueron definidos a partir de una distribución sistemática estratificada. Las muestras obtenidas totalizaron 466, de las cuales 263 fueron recolectadas cada 250 m en las principales áreas urbanas de ambas comunas, 191 con un distanciamiento de 1150 m entre ellas en el área rural, y 12 muestras recolectadas en forma aleatoria en la Cordillera de la Costa.

2.2 Fondo geoquímico de los suelos

Con objeto de determinar las concentraciones de elementos traza de origen no-antrópico en suelos, para establecer un fondo geoquímico, se muestreó en suelos fuera del área de influencia del CIV con las mismas características pedológicas que los presentes dentro del área de influencia. Con este fin, se recolectaron muestras en Series de suelo, descritas agrológicamente, presentes dentro y fuera de las comunas de Quintero y Puchuncaví, que correspondieron a las Series Loncura, Lo Vásquez y Catapilco, descritas por el CIREN (1997). De esta forma, de cada Serie se tomaron 30 muestras, 15 dentro de ambas comunas y 15 fuera de ellas, a tres rangos de profundidad de suelo: 0-15 cm, 15-30 cm y 30-45 cm. El detalle de las variables estadísticas para las muestras de fondo geoquímico se pueden observar en la Tabla 1.

El valor de fondo geoquímico se estimó con el percentil 95% de las muestras agrológicas obtenidas fuera del área de influencia del CIV, mediante el programa ProUCL.

2.3 Interpolación espacial

La distribución espacial del arsénico se estimó mediante el método geo-estadístico kriging, a partir de las 466 muestras recolectadas dentro de la zona de estudio.

3 Resultados y discusiones

3.1 Fondo geoquímico y concentraciones

En las zonas urbanas los valores máximos de As se obtuvieron en las ciudades de Quintero y Ventanas, con valores de 305 y 78 mg/kg, respectivamente. El valor máximo para todas las muestras obtenidas fue 825 mg/kg, en tanto que el mínimo fue de 4.1 mg/kg. Cercano al CIV (~5 km) se observaron las mayores concentraciones de As, como se puede observar en la Figura 1. El valor de fondo se estimó en 18.6 mg/kg; las zonas que superaron este valor en la interpolación, realizada mediante el método kriging, se pueden ver representada en la Figura 1, que corresponde al rango entre 19 y 22.1 mg/kg, y los rangos superiores.

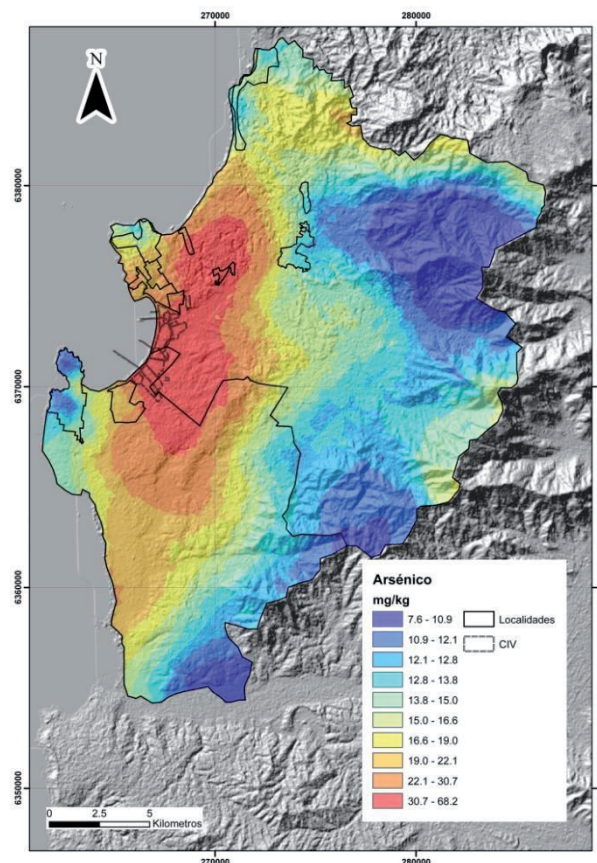


Figura 1. Distribución espacial de arsénico, las mayores concentraciones están cercano al CIV, con rangos entre 30 y 68 mg/kg.

Al comparar las concentraciones con la norma canadiense de suelos, la cual es 12 mg/kg para As, indicaría que gran parte de la zona estaría contaminada.

Se realizaron análisis geoquímicos de rocas, en las principales formaciones geológicas presentes en la zona de estudio. La concentración máxima de As en las muestras de roca fue 13.8 mg/kg en la Formación Ajial, y el valor de fondo geoquímico correspondió a 10.58 mg/kg. Este valor, ligeramente menor al obtenido con el fondo geoquímico, es esperable considerando que el proceso de meteorización y de pedogénesis ha derivado en suelos con concentraciones de As ligeramente superiores, donde este elemento tiende a ser retenido y acumulado en minerales de arcilla, óxidos de Fe y Mn y en la materia orgánica.

Si bien el As no presentó una diferencia estadística significativa en profundidad en ninguna de las tres profundidades evaluadas, presentó mayores concentraciones entre 0-15 cm dentro de la zona de influencia del CIV en comparación a sus símiles evaluados fuera de esta (Tabla 2). De esta forma, los valores de As evidenciaron diferencias en los máximos obtenidos entre las Series agrológicas, evaluadas adentro y fuera del área de influencia del CIV, los cuales fueron de 45.8 mg/kg y 20.5 mg/kg, respectivamente.

Tabla 1. Datos estadísticos arsénico. Concentraciones en mg/kg. Std: desviación estándar, Mad: desviación media absoluta.

Estadísticos	Series Fuera	Series Dentro	Total
#	45	45	466
Promedio	9	9.3	24.1
Mediana	8.4	7.3	15.7
Máximo	20.5	45.8	825
Mínimo	1.7	2.4	4.1
Std	5.83	8.65	44.01
Mad	5.3	3.9	5.2
Percentil 95	18.6	23.3	55.4

Tabla 2. Comparación estadística entre series fondo geoquímico dentro y fuera de la zona de estudio.

Profundidad 0-15 cm		
Ubicación	Estadístico	Valor(mg/kg)
Dentro área de estudio	Promedio	14.6
	Máximo	45.8
	Mínimo	2.7
Fuera área de estudio	Promedio	10.4
	Máximo	19.8
	Mínimo	3.1

Las concentraciones de As en la zona de estudio se han atribuido en diversos estudios a actividad antrópica, relacionadas específicamente a las fuentes de emisión atmosférica del CIV. De Gregori (2003) plantea que las altas concentraciones de Cu, y en menor medida de As, en el valle de Puchuncaví han sido producidas por la deposición de material particulado proveniente de la

actividad industrial. Esto concuerda con González y Bergqvist (1986), que afirman que no es posible invocar alguna causa natural a altas concentraciones de elementos trazas en la zona, ya que el problema se encuentra restringido a un área geográfica limitada y con una génesis temporal definida.

3.2 Factor de enriquecimiento y análisis de factores: arsénico antrópico o natural

El análisis de Factor de Enriquecimiento (FE) permite determinar elementos con concentraciones asociadas a alteración antrópica, mediante la comparación entre las concentraciones medias en la corteza y las encontradas en la zona de estudio. En este caso se utilizó el aluminio como elemento refractario de referencia, ya que se asume que este elemento no presenta alteración antrópica (Calvo et al., 2008). Los valores de referencia de concentración en la corteza superior son basados en la recopilación realizada por Taylor y Mc Lennan (1995), y el valor de la concentración de aluminio en la zona de estudio se obtuvo de Parra et al. (2014a).

El FE para As fue de 15.22, lo que basado en Valdés (2011), el cual establece un límite de FE >10 para fuentes antrópicas, sugiere este origen para las concentraciones de As en la zona de estudio.

Otro análisis realizado sobre el set de datos fue el Análisis de Factores (AF), el cual se obtuvieron correlaciones entre los elementos As, Cu, Mo, Cd, Pb y Hg, los cuales están relacionados con las emisiones atmosféricas de fundiciones de Cu (González y Ite, 1992; De Gregori et al., 2003; Parra et al., 2014a; Parra et al., 2014b).

4 Conclusiones

Las concentraciones de As indican un impacto por la actividad industrial del CIV, en los suelos de las comunas de Quintero y Puchuncaví, misma conclusión a lo cual han llegado otros autores que han trabajado en la zona de estudio. En la Figura 1, se observa que la zona con mayores concentraciones de As se encuentra entorno al CIV, lo que concuerda con los resultados obtenidos en los estudios antes mencionados. Por otra parte una gran extensión de la zona de estudio está por sobre la norma canadiense. El FE y el AF, indican que el origen de las concentraciones por sobre el fondo geoquímico no son naturales, las cuales estarían asociadas en mayor medida a la fundición de cobre de Ventanas.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer al Ministerio del Medio Ambiente, gracias al cual se pudo realizar el presente estudio.

Referencias

- Basta, N., Gradwohl, R. 2000. Estimation of Cd, Pb and Zn Bioavailability in smelter-contaminated soils by a sequential extraction procedure. *Journal of Soil Contamination*, 9 (2): 149-164.
- Calvo, AI., Pont, V., Liousse, C., Dupré, B., Mariscal, A., Zouiten, C., Gardrat, E., Castera, P., Lacaux, CG., Castro, A and Fraile, R. 2008. Chemical composition of urban aerosols in Toulouse, France during CAPITOUL experiment. *Meteorol Atmos Phys.*; 102: 307-323.
- Cámara de Diputados (Comisión de Recursos Naturales, Bienes Nacionales y Medio Ambiente de la Cámara de Diputados). 2011. Informe de la Comisión de Recursos Naturales, Bienes Nacionales y Medio Ambiente recaído en el mandato otorgado por la sala a fin de analizar, indagar, investigar y determinar la participación de la empresa Estatal CODELCO y empresas asociadas, en la contaminación ambiental de la zona de Puchuncaví y Quintero.
- CIREN. 1997. Estudio Agrológico V Región. Descripciones de suelos, materiales y símbolos. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), Santiago, Chile. 371 p.
- CODELCO. 2015. Emisiones de fundiciones. En línea: https://www.codelco.com/emisiones-de-fundiciones/prontus_codelco/2011-07-11/105820.html
- De Gregori, I., Fuentes, E., Rojas, M., Pinochet, H. y Potin-Gautier, M. 2003. Monitoring of copper, arsenic and antimony levels in agricultural soils impacted and non-impacted by mining activities, from three regions in Chile. *Journal of Environmental Monitoring* 5:287-295.
- González, S., Bergqvist, E. 1986. Evidencias de contaminación con metales pesados en un sector sel secano costero de la V Región. *Agricultura Técnica*, 46 (3): 299-306.
- González, S. y Ite, R. 1992. Acumulación metálica en suelos del área bajo influencia de las chimeneas industriales de ventanas. *Agricultura Técnica*, 50: 214-219.
- Gough, L., Eppinger R., Brigge, H., Giles S. 2006. Biogeochemical characterization of an undisturbed highly acidic, metal-rich bryophyte habitat, east-central Alaska, U.S.A. *Antarctic Alpine Res.* 38: 522-529.
- Ibáñez, R. 1993. Estudio de impacto ambiental en la Comuna de Puchuncaví, V Región. Tesis para optar a título de Ingeniero Civil en Minas. Departamento de Ingeniería en Minas, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. 308 p.
- Kabata-Pendias, A. 2011. Trace elements in soils and plants. Cuarta edición. Taylor and Francis group. 505 p.
- Luzio W., Casanova M., Seguel O. 2010. Suelos de Chile. Luzio W. (Editor). Universidad de Chile. Chile. 346 p.
- Parra, S., Bravo, M. A., Quiroz, W., Moreno, T., Karanasiou, A., Font, O., Vidal, V. y Cereceda, F. 2014a. Distribution of trace elements in particle size fractions for contaminated soils by a copper smelting from different zones of the Puchuncavi Valley (Chile). *Chemosphere* 111:513-521 p.
- Parra, S., Bravo, M. A., Quiroz, W., Moreno, T., Karanasiou, A., Font, O., Vidal, V. y Cereceda-Balic, F. 2014b. Source apportionment for contaminated soils using multivariate statistical methods. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 138:127-132 p.
- Rivano, S., Sepúlveda, P., Boric, R. y Espiñeira, P. 1993. Mapa Geológico de la Hoja Quillota-Portillo (escala 1: 250.000), V Región de Valparaíso. Carta geológica de Chile. 73 p.
- Taylor, S. R. y McLennan, S. M. 1995. The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews of Geophysics* 33:241-265.
- Valdés, A. 2011. Mineralogía et geoquímica del material particulado respirable (pm10 et pm2.5) present dans l'air de Santiago, Chili; contribution à sa caractérisation et l'identification de ses sources. Tesis doctoral. Université Toulouse III – Paul Sabatier. 269 p.
- Vangronsveld, J. 1998. Case studies in the field—arsenic contaminated kitchen gardens. *Metal- Contaminated Soils: In Situ Inactivation and Phytoremediation*. Vangronsveld, J. Springer-Verlag. Berling, 227-228.