

## METALOFITAS EN EL TENIENTE Y SU POTENCIAL PARA LA REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR COBRE

Isabel González<sup>1</sup>, Mauricio Cisternas<sup>2</sup>, Ursula Kelm<sup>3</sup> & Alexander Neaman<sup>4,5,\*</sup>

<sup>1</sup> Magíster en Producción Agroambiental, Área de Medio Ambiente <sup>4</sup> Dr. en Ciencias del suelo, Área de Medio Ambiente <sup>2</sup> Ingeniero Agrónomo, Laboratorio de Fitogenética

Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Casilla 4-D, Quillota, Chile

<sup>3</sup> Instituto de Geología Económica Aplicada, Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Concepción, Chile

<sup>5</sup> Centro Regional en Alimentos Saludables (CREAS), Región de Valparaíso, Chile

\* Correspondencia: [alexander.neaman@ucv.cl](mailto:alexander.neaman@ucv.cl)

### Minería del cobre, metalofitas y fitorremediación

La minería de cobre es una de las actividades económicas más importantes en Chile, lo que se traduce en la existencia de un gran número de minas y plantas de fundición de mineral. Aunque esta actividad ha generado históricamente, fuentes de trabajo, además de la ocupación del territorio en el norte-centro del país, paralelamente ha tenido un efecto negativo en el medio ambiente. De hecho, la minería es una de las actividades en Chile que genera mayor cantidad de desechos, como consecuencia de los distintos procesos involucrados en la elaboración de los productos finales. Hoy en día, existe legislación que regula parte de los impactos generados por la actividad minera (por ej., D.S 248, sobre tranques de relaves), sin embargo, el mayor daño fue el causado previo al establecimiento de dicha normativa. Estos daños no remediados, denominados Pasivos Ambientales Mineros (PAM) incluyen a la gran cantidad de relaves que fueron abandonados sin la adopción de medidas de seguridad o de protección ambiental, los cuales, cargados en contaminantes, suelen sufrir fallas, contaminando aguas o suelos aledaños, así como procesos erosivos que transportan el material lejos de la fuente. También se incluye en los PAM, la contaminación acumulada en los suelos de las áreas aledañas a fundiciones de mineral, que recibieron por años las deposiciones cargadas de metales pesados provenientes de las chimeneas. En estas áreas, que suelen cubrir varios kilómetros desde la fuente de contaminación, se han visto gravemente afectados los ecosistemas, así como la salud y economía de las poblaciones comprometidas (Kabata-Pendias, 1995).

Hoy en día Chile está creciendo la conciencia ambiental tanto a nivel, gubernamental, empresarial, como en la ciudadanía. Por otro lado, la presión ejercida por la adopción de medidas y normativas ambientales a nivel mundial, obliga al país a ponerse al mismo nivel que los países con los cuales mantiene relaciones comerciales. Esto, traducido a nivel de los PAM, sugiere que en el corto plazo se generarán en Chile normativas asociadas a la remediación de los daños causados a los ecosistemas por la actividad minera pasada (Valencia, 2007)

Entre las técnicas de remediación de suelos contaminados por metales, las más conocidas son las técnicas tradicionales, las cuales son eminentemente fisico-químicas, por ejemplo, la vitrificación, el lavado de suelo, la electrocinética, etc. (Environmental Protection Agency,

2006). Aunque estas técnicas suelen ser muy eficientes en la remoción del contaminante deseado, tienen la desventaja de ser muy costosas, además de alterar irreversiblemente las características originales de los suelos. Por estas razones se han buscado tecnologías más baratas, ambientalmente adecuadas y que permitan mayores opciones de uso posterior.

Dentro de los nuevos métodos emergentes está la fitorremediación, definida como el conjunto de técnicas que hace uso de especies vegetales para remover o dejar en formas inocuas contaminantes. Entre las técnicas de fitorremediación, la fitoextracción hace uso de especies “hiperacumuladoras”, es decir, capaces de acumular grandes cantidades de metales en su biomasa aérea (sobre 1000 mg/kg). Una vez que estas plantas absorben los metales del suelo, son cosechadas, permitiendo así la remoción definitiva del contaminante. Por otro lado, la fitoestabilización, hace uso de especies excluyentes, es decir que impiden el paso de contaminantes a su biomasa aérea, acumulándolos en sus raíces, ya sea absorbidos dentro de ellas o adsorbidos sobre su superficie. De esta forma los contaminantes quedan inmóviles en el suelo, previniéndose su dispersión y su paso a la cadena trófica. Para este proceso es preferible el uso de especies perennes, ya que así los contaminantes se mantienen continuamente estabilizados (Baker y Brooks, 1989).

El principal requisito para que una planta sea útil para alguna técnica de fitoremediación es que sea tolerante a altas concentraciones de metales, ya sea a uno o varios al mismo tiempo. Estas especies, que representan un porcentaje muy bajo de las angiospermas (menos del 0,2%) se denominan “metalofitas” (Baker *et al.*, 2002). Las metalofitas suelen encontrarse en sitios metalíferos, ya sea debido a causas naturales (cercanías de pórfidos) o por causas antrópicas (suelos afectados por fundiciones o depósitos de desechos mineros). En estos sitios se ha generado por años un proceso de adaptación y selección de especies, que ha dado como resultado, que solo las especies y poblaciones resistentes se mantengan en el lugar (Bratteler *et al.*, 2006).

En Chile, se han identificado algunas metalofitas, aunque muy pocas en relación a otros países. Todas ellas son metalofitas para cobre, y se han identificado en suelos contaminados por actividades mineras (tabla 1).

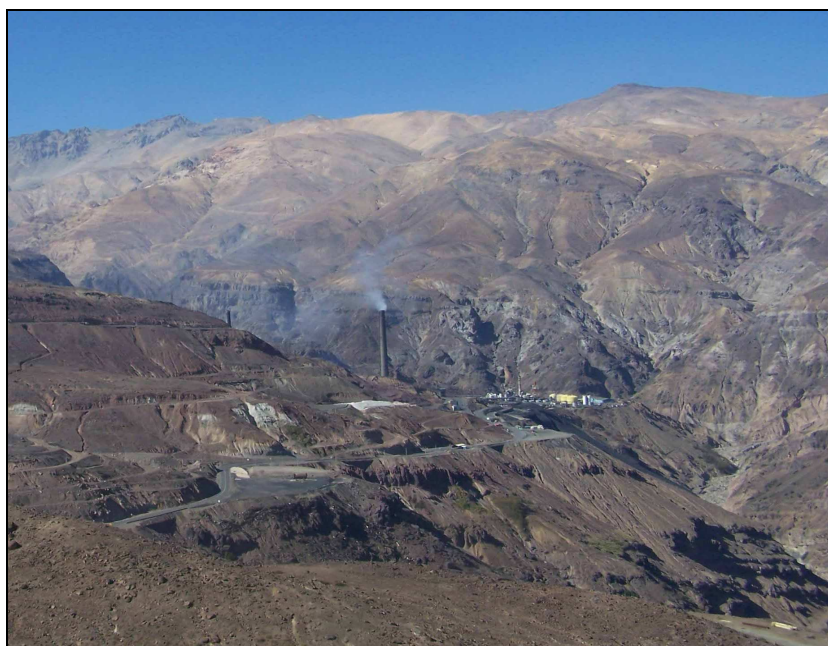
Especie	lugar	Origen de las altas concentraciones de Cu
<i>Mimulus luteus</i> var. <i>variegatus</i> , <i>Chenchrus echinatus</i> , <i>Erygerom</i> <i>berterianum</i> , <i>Mullinum spinosum</i>	Sewell, Comuna de Machalí, Región del Libertador Bernardo O' Higgins	Fundición Caletones, Mina El Teniente
<i>Dactylum</i> sp	Comuna de Copiapó, Región de Atacama	ENAMI (Fundición Hernán Videla)
<i>Noluna divaricada</i>	Paposo, comuna de Tal-Tal, Región de Antofagasta	Minera Hierro Paposo
<i>Oenothera affinis</i> , <i>Baccharis</i> <i>linearis</i> , <i>Argemone subfusiformis</i> , <i>Sphaeralcea velutina</i> , <i>Escholtzia</i> <i>californica</i> , etc	Los Maitenes, Puchuncaví, Región de Valparaíso	Fundición CODELCO Ventanas

Tabla 1. Metalofitas identificadas en Chile, lugar de origen y fuente de contaminación (Bech *et al*, 2001; Ginocchio *et al.*, 2002; González *et al*, 2008, entre otros)

### El caso de la mina El Teniente

La mina El Teniente, se ubica en la comuna de Machalí, en la región del Libertador Bernardo O' Higgins, a 120 km al Sur de Santiago. Es la mina subterránea de cobre más grande del mundo. La Fundición Caletones, perteneciente a esta mina, puesta en marcha en 1922, se ubica aproximadamente a 15 km al oeste de la mina, y es donde se producen los lingotes RAF y ánodos de cobre, y en una menor proporción, cobre blister y cátodos de alta pureza. La fundición tiene una producción de aproximadamente 430 ktpa (kilo toneladas por año) (CODELCO, 2008).

Lamentablemente, como resultado del proceso productivo de la Fundición Caletones, se emiten por su chimenea anhídrido sulfuroso y material particulado rico en Cu, As, Pb y otros elementos, además de monóxido y dióxido de carbono y gases nitrosos. Estas emisiones eran muy elevadas en los comienzos del funcionamiento de la fundición, ya que no existían regulaciones ambientales que las controlaran. La pluma de contaminación llevada por los vientos O-E, afectó severamente las zonas aledañas a la fundición, principalmente la localidad de Sewell, que servía antiguamente como asentamiento para los trabajadores de la mina el Teniente (Figura 1). Actualmente, gracias a un plan de descontaminación atmosférica implementado en 1998, la fundición cumple con la normativa de calidad de aire, sin embargo aún quedan por solucionar los daños que causaron años de acumulación de contaminación en las cercanías de esta zona (Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO), 2004).



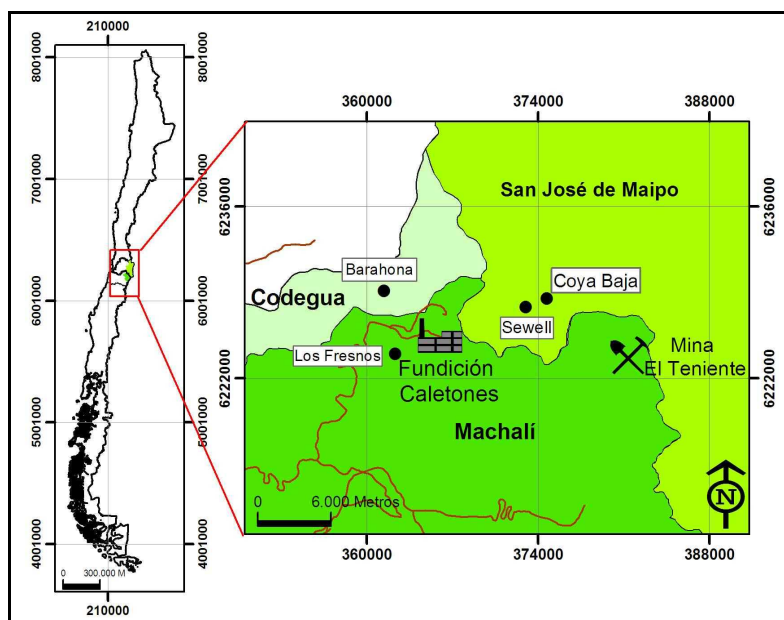
**Figura 1.** Visión general de la transición de precordillera a cordillera principal, en el centro se observa la Fundición Caletones y la pluma de contaminación.

Los suelos aledaños a la Fundición llegan a niveles promedio de 1.025 mg/kg (Ginocchio *et al.*, 2002), valor que se puede considerar sobre lo normal comparado con normativas internacionales como la la *Swedish Environmental Protection Agency* (disponible en [www.internat.naturvardsverket.se](http://www.internat.naturvardsverket.se)) que postula que los suelos con una concentración total de cobre superior a 100 mg kg<sup>-1</sup> deben ser considerados como contaminados. Sin embargo se debe considerar que los suelos del área tienen altos niveles de metales de fondo, ya que están cercanos al pórfido cuprífero que da origen a la mina El Teniente.

Aunque se han realizado algunas investigaciones científicas en el área referidas a algunas especies en particular (Tabla 1), nunca se intentó caracterizar la vegetación existente. Las especies que se desarrollan en el lugar, debido a los años de adaptación y selección generados por la contaminación, forman actualmente una comunidad de metalofitas, que poseen un valor agregado por su potencial utilidad para procesos de recuperación de suelos. Es por esto que se propuso realizar una caracterización de la diversidad de especies existentes en las cercanías de la Fundición Caletones, evaluando además su concentración de cobre en tejidos, lo que se utilizó como parámetro para evaluar su utilidad para la fitorremediación.

#### Muestreo de especies metalofitas

Para realizar un muestreo representativo del área, se escogieron 4 sectores cercanos a la Fundición Caletones: Sewell, Los Fresnos, Coya Baja y Barahona. Sewell y Coya baja a 7 y 9 km al NE de la fundición, en la comuna de San José de Maipo. Los Fresnos, a 4 km al O de la fundición, en la comuna de Machalí y Barahona, a 6 km al NO de la fundición, en la comuna de Codegua (Figura 2).



**Figura 2.** Sitios de muestreo de especies en las cercanías de la Fundición Caletones.

La vegetación encontrada en las 4 áreas de muestreo es poco abundante, lo que puede considerarse natural ya que por la altura, se desarrolla una estepa fría de hierbas y pastos duros, que en zonas algo más bajas se mezclan con algo de bosques y matorral mediterráneo. Sin embargo, indudablemente existe un efecto de la contaminación sobre la riqueza y abundancia de especies, el cual no es posible cuantificar ya que no existen estudios de vegetación previos a la existencia de la fundición.

En el muestreo se lograron identificar 16 taxas, 12 de ellas hasta el nivel de especie (Tabla 1) y algunas otras, por su estado fenológico solamente se identificaron a nivel de género.

Como se esperaba por la formación vegetal del sector, la mayoría de las especies son herbáceas, identificándose solo una especie arbustiva, *Baccharis salicifolia*. La mayoría de las especies herbáceas identificadas son de forma de vida perenne, renovándose año a año a partir de sus estructuras subterráneas. Esto es común en sitios contaminados ya que las especies anuales o bianuales desaparecen gradualmente debido a que el porcentaje de germinación baja a causa de la alta contaminación (Tabla 2).

En relación a la absorción de cobre, se puede observar que la mayoría de las plantas presenta concentraciones en tejidos por sobre lo normal (establecido en 20 mg/kg por Adriano, 1986). Sin embargo, ninguna especie presentó concentraciones que las clasifiquen como hiperacumuladoras, por lo tanto no serían de uso preferente para la fitoextracción. La especie en la que se detectó mayor concentración fue en *Juncus scheuchzeroides* (340 mg/kg).

Por otro lado, las especies *Cynoglossum creticum* y *Galega officinalis* presentaron valores normales de Cu en su biomasa aérea (Tabla 2), lo que significa que el metal se mantiene en las raíces o en la rizósfera, sin traslocarse a los órganos aéreos, es decir, se mantienen estabilizados sin riesgo de diseminarse por el aire (Cunningham *et al.*, 1995). Sin embargo, *Cynoglossum creticum* es de forma de vida terófito, por lo que acabando su ciclo muere y los contaminantes vuelven al suelo, diseminándose nuevamente. Esto la descarta para poder utilizarse en procesos de fitoestabilización. En conclusión, solamente la especie *Galega officinallis* sería, adecuada, a modo preliminar, para ser utilizada en un proceso de fitorremediación, específicamente para fitoestabilización. Sin embargo para asegurar su utilidad, es necesario realizar evaluaciones más detalladas para la especie. Se debe evaluar su respuesta ante características variables de suelo, distintas concentraciones de cobre, distintas condiciones edafo-climáticas, etc, para determinar su aplicabilidad en condiciones de campo.

Esta investigación demuestra que es posible identificar especies con potencial para distintas técnicas de fitorremediación de suelos contaminados por metales, si se explora dentro de la diversidad vegetal existente dentro de estos mismos sitios.

**Tabla 2** Especies metalofitas muestreadas en las cercanías de El Teniente. Se indica la familia taxonómica, la forma de vida (FV) la forma biológica (FB), el origen, y la concentración de Cu en la parte aérea

<b>Familia</b>	<b>Especie</b>	<b>Nombre común</b>	<b>FV</b>	<b>FB</b>	<b>Origen</b>	<b>Concentración Cu [mg/kg]</b>
Asteraceae	<i>Anthemis cotula</i> L.	Manzanilla amarga	TR	hierba	adventicia	150
Asteraceae	<i>Baccharis salicifolia</i> (R. et P.)	Chilca	NF	arbusto	adventicia	89
Scrophulariaceae	<i>Verbascum thapsus</i> L.	Hierba del paño	TR	hierba	adventicia	100
Boraginaceae	<i>Cynoglossum creticum</i> Mill.	Trupa	TR	hierba	adventicia	20
Scrophulariaceae	<i>Verónica anagallis-acuática</i> L.	Nomeolvides	HC	hierba	adventicia	270
Chenopodiaceae	<i>Chenopodium ambrosioides</i> L.	Paico	HC	hierba	nativa	25
Convolvulaceae	<i>Convolvulus arvensis</i> L.	Correhuela	CR	hierba	adventicia	93
Fabaceae	<i>Galega officinalis</i> L.	Galega	HC	hierba	adventicia	18
Poaceae	<i>Polypogon australis</i> Brongn.	Cola de ratón	HC	hierba	nativa	210
Juncaceae	<i>Juncus scheuchzerioides</i> Gaud.	Junquillo	HC	hierba	nativa	340
Cyperaceae	<i>Carex goodenoughii</i> Gay	-	HC	hierba	nativa	79
Scrophulariaceae	<i>Mimulus luteus</i> L.	Berro amarillo	TR	hierba	nativa	210

## **Bibliografía**

- BAKER AJM & RR BROOKS (1989) Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements: A review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery* 1: 81-108.
- BAKER A, SN WHITING & D RICHARDS (2002) Metallophytes: a unique biodiversity resource "owned" by the mining industry. 9th New Phytologist Symposium: Heavy Metal and Plants, University of Pennsylvania, Philadelphia, Pennsylvania, USA.
- BECH J, C POSCHENRIEDER, J BARCELÓ & A LANSAC (2001) Plants from mine spoil in the South American area as potential source of germplasm for phytoremediation technologies.
- BRATTELER M, C LEXER & A WIDMER (2006) Genetic architecture of traits associated with serpentine adaptation of *Silene vulgaris*. *Journal of Evolutionary Biology* 19: 1149-1156.
- BRAUN J (2000) Economía chilena 1810-1995: estadísticas históricas. Pontificia Universidad Católica de Santiago, Instituto de Economía, Santiago, Chile.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2006) In Situ Treatment Technologies for Contaminated Soil. Pp. 35 pp. Environmental Protection Agency, Washington D.C, USA.
- GINOCCHIO R, I TORO, D SCHNEPF & R MACNAIR (2002) Copper tolerance testing in populations of *Mimulus luteus* var. *variegatus* exposed and non-exposed to copper mine pollution. *Geochemistry, Exploration, Environment, Analysis* 2: 151-156.
- GINOCCHIO, R., I. TORO, D. SCHNEPF Y R. MACNAIR. 2002. Copper tolerance testing in populations of *Mimulus luteus* var. *variegatus* exposed and non-exposed to copper mine pollution. *Geochemistry, Exploration, Environment, Analysis* 2:151-156.
- GONZÁLEZ, I., V. MUENA, M. CISTERNAS Y A. NEAMAN. 2008. Acumulación de cobre en una comunidad vegetal afectada por contaminación minera en el valle de Puchuncaví, Chile central. *Revista Chilena de Historia Natural* 81:279-291.
- KABATA-PENDIAS A (1995) Agricultural problems related to extensive trace metal contents of soils in: Salomons W, U Förstner & P Mader (eds) *Heavy metals, problems and solutions*: 3-18. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- VALENCIA C (2007) Anteproyecto de Ley de Pasivos Ambientales Mineros y Cierre de Faenas Mineras. Pp. 216. Seminario Innovación Tecnológica y Sustentabilidad Ambiental en la Industria Minera. Seminario Innovación Tecnológica y Sustentabilidad Ambiental en la Industria Minera. SERNAGEOMIN-CIMM, Santiago.