

Estudio prospectivo de los principales metales pesados de suelos agrícolas cultivados con trigo candeal y maíz en diferentes zonas de Chile

J. Hirzel^{1,*}, I. Walter² e I. Matus¹

Introducción

Las propiedades químicas de suelos agrícolas de importancia para las plantas cultivadas contemplan una amplitud de elementos o parámetros, dentro de los cuales se encuentran aquellos considerados como esenciales, otros considerados como benéficos, y finalmente elementos que al superar una determinada concentración se consideran como dañinos o tóxicos (Benton, 1998; Epstein, 1994; Glass, 1989; Mengel y Kirkby, 1987). Dentro de estos parámetros se encuentran los micronutrientes, que se pueden agrupar en cationes y aniones en función de su carga química (Benton, 1998; Mengel y Kirkby, 1987), y que a su vez, incluyen un grupo denominado metales pesados, caracterizados porque su peso atómico es a lo menos cinco veces mayor al de la molécula del agua, además de una alta densidad relativa (Kabata-Pendias y Pendias, 2001), y un efecto tóxico cuando se encuentran en alta concentración, tanto para plantas como para humanos (McDowell et al., 2013; Nicholson et al., 2003; Wong et al., 2002). La presencia de metales pesados en suelos agrícolas está asociada con ciclos geoquímicos y biológicos complejos que además son influenciados por factores antropogénicos como prácticas agrícolas, actividad industrial, tratamientos con enmiendas orgánicas, y tránsito vehicular (Buccolieri et al., 2010; Kabata-Pendias y Pendias, 2001; Kabata-Pendias, 2004). A su vez, la contaminación con metales pesados en los cultivos depende principalmente de los siguientes factores: concentración de los metales pesados de línea base, características físico-químicas del suelo, toxicidad específica de cada metal, y diferencias entre especies, variedades y estado de crecimiento de la planta (Cajuste et al., 2006; Graham et al., 2007; Grant et al., 2008; Lehoczky et al., 2006).

Estudios de metales pesados en suelos agrícolas han sido realizados por varios autores en diferentes lugares del mundo (Buccolieri et al., 2010; Horckmans et al. 2005; McDowell et al., 2013; Sierra et al., 2007; Qiao et al., 2011), por citar algunos, sin embargo, para las condiciones de suelos agrícolas de Chile existen aún pocos estudios (González et al., 1997; Villanueva, 2003). Por su parte, el desarrollo de los cultivos de trigo candeal y maíz en Chile, de alta importancia en la dieta humana y/o animal de este país, ocupa una extensa área de cultivo que en conjunto comprende del orden de 1400 km de longitud entre los paralelos 28.5 y 41.2 de latitud sur. Esta extensa área geográfica presenta mucha variabilidad de tipos

de suelo y propiedades químicas (CIREN 1996, 1997 y 1999; Luzio, 2010), cuya caracterización en las diferentes zonas geográficas no contempla las concentraciones de metales pesados en la capa arable del suelo, y a su vez no permite conocer o estimar si estos elementos constituyen limitaciones nutricionales de forma previa a la realización de un cultivo, como ha sido detectado para zinc (Zn) y manganeso (Mn) en el cultivo de trigo candeal en la zona centro sur de Chile (Hirzel y Matus, 2011). Por consiguiente, para contribuir a un mayor conocimiento de la fertilidad del suelo y de su variabilidad a lo largo de la zona productora de trigo candeal y maíz de Chile, el objetivo del presente estudio fue determinar los contenidos de los metales pesados hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), cobre (Cu) y cadmio (Cd) extraíbles por DTPA en cuatro grandes áreas geográficas, evaluando su variabilidad entre áreas y dentro del perfil arable del suelo.

Materiales y métodos

El estudio contempló un muestreo al azar de suelos cultivados de forma intensiva con trigo candeal y/o maíz, de rotación corta con cereales o monocultivo para el maíz, en un transecto de 1400 km a lo largo del valle central de riego de Chile. La extensión territorial monitoreada se dividió en 4 zonas de acuerdo a su posición geográfica desde norte a sur, separadas en zona centro-norte, zona central, zona centro-sur y zona sur (**Figura 1**), utilizando parte de la metodología señalada por Qiao et al. (2011), que permite agrupar las zonas seleccionadas de acuerdo a sus características climáticas y de génesis de suelo. En el periodo libre de cultivo del año 2012 se monitorearon 10 unidades productivas o sitios de cada zona geográfica, colectando muestras compuestas por 30 sub-muestras desde cada sitio, con lo cual se constituyeron 40 muestras compuestas a lo largo del transecto de suelos estudiado. En cada sitio las muestras de suelo se colectaron a 2 profundidades: 0-20 y 20-40 cm usando barreno de 3 cm de diámetro. Las 4 zonas monitoreadas presentaron principalmente las siguientes características;

- i. **Zona centro-norte**, con régimen árido y formación sedimentaria con origen aluvial. Los órdenes de suelo correspondieron a Entisol, Inceptisol y Alfisol.
- ii. **Zona central**, con régimen semi-árido y formación sedimentaria con origen aluvial o lacustre. Los órdenes de suelo correspondieron a Inceptisol, Mollisol, Alfisol y Vertisol.

¹ Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Chile. Avenida Vicente Méndez 515, Chillán, Chile

² Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA), Apdo. Correos 8111, 28080 Madrid, España

* Autor de contacto. Correo electrónico: jhirzel@inia.cl

iii. Zona centro-sur, régimen templado y formación sedimentaria con origen aluvial, volcánico y de transición. Los órdenes de suelo correspondieron a Inceptisol, Alfisol y Andisol.

iv. Zona sur, régimen templado lluvioso y formación sedimentaria con origen volcánico. Los órdenes de suelo correspondieron a Andisol y Ultisol.

Las rotaciones de cultivos en cada localidad muestreada fueron las siguientes: i) Zona centro-norte; trigo candeal-maíz ó monocultivo de maíz, ii) Zona central; trigo candeal-maíz ó monocultivo de maíz, iii) Zona centro-sur; trigo candeal-maíz, trigo candeal-avena (*Avena sativa* L.), monocultivo de maíz, iv) Zona sur; trigo candeal-maíz, trigo candeal-avena, monocultivo de maíz. Antecedentes adicionales de manejo como encalado u otras prácticas de acondicionamiento de suelos no fueron consideradas como parámetro de selección de sitios a muestrear, y todos los suelos de las zonas centro sur y sur reciben encalado cada 2 a 4 años para corregir limitaciones de Al. A su vez, en todos los suelos de las zonas estudiadas no se incorporan residuos de cosecha.

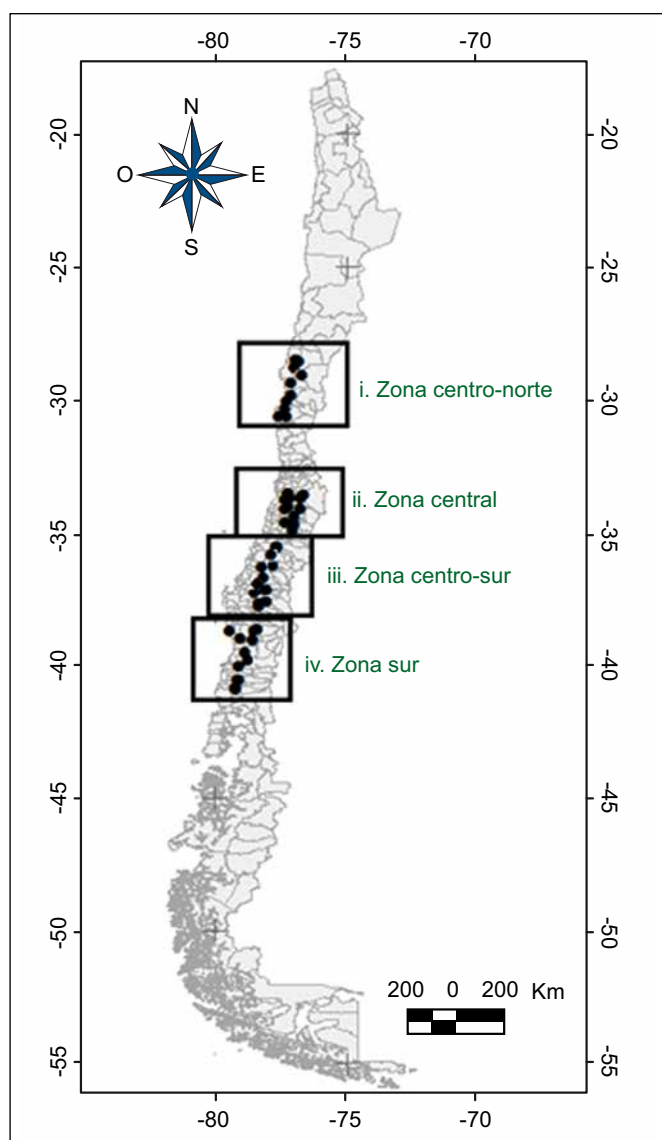


Figura 1. Distribución de muestras de suelo colectadas desde norte a sur en el área de estudio.

Tabla 1. Análisis de significancia de los parámetros evaluados en el suelo.

Fuente de variación	Área geográfica (G)	Profundidad de suelo (P)	Interacción (G*P)
Hierro	**	*	NS
Manganeso	**	**	NS
Zinc	**	**	NS
Cobre	**	**	NS
Cadmio	**	**	NS

*, ** Significativo a 0.05 y 0.01 de probabilidad. NS, no significativo

Las muestras de suelo fueron secadas al aire, tamizadas por 2 mm y analizadas para Fe, Mn, Zn, Cu y Cd en DTPA (Lindsay y Norvell, 1978) por espectrometría de absorción atómica. Además, el Cd-DTPA fue determinado por la metodología señalada por Degryse et al. (2009). Los resultados analíticos fueron evaluados estadísticamente, para cada elemento por separado, a través de un diseño de bloques al azar con arreglo en parcelas divididas, donde la parcela principal correspondió a la zona geográfica y la sub-parcela a la profundidad de muestreo. Se realizó análisis de varianza y test de medias Tukey ($p = 0.05$) usando el procedimiento GLM del programa estadístico SAS (SAS Institute, 2008).

Resultados y discusión

Todos los parámetros evaluados en el suelo fueron afectados por el área geográfica y la profundidad de suelo, sin presentarse interacción entre estos factores (Tabla 1). El análisis de resultados por profundidad del suelo se presenta a continuación.

Primera profundidad (0-20 cm)

La disponibilidad de Fe en las 4 zonas estudiadas fluctuó entre 22 y 52 mg kg⁻¹, y fue mayor en la zona sur, que sólo superó a la concentración obtenida en la zona centro-norte ($p < 0.05$) (Figura 2a). Estos valores se encuentran dentro del rango de > 4.5 mg kg⁻¹ señalado como alto para suelos agrícolas en extracciones con DTPA (Havlin et al., 1999). La mayor concentración de Fe disponible en el suelo de la zona sur puede estar asociada al menor pH en esta zona (Tabla 2), dado que la mayor concentración de protones en suelos de menor pH genera un ambiente de reducción y los óxidos de Fe (FenOn) presentes en el suelo se hacen disponibles a la forma de Fe²⁺ o Fe³⁺ (Havlin et al., 1999). Conociendo estas reacciones de óxido-reducción en el suelo se habrían esperado también diferencias de concentración entre el suelo de la zona sur y los suelos de la zona central, de mayor pH que los suelos de la zona sur (Tabla 2), sin embargo el método de extracción utilizado (DTPA) no sólo accede al Fe²⁺ y Fe³⁺ presente en el suelo, sino también a una fracción intercambiable, carbonatada y de óxidos e hidróxidos (López y Mandado, 2002; Madrid et al., 2007).

Tabla 2. Rango de valores medios de propiedades físico-químicas seleccionadas para las 4 áreas geográficas estudiadas (0-20 cm).

Propiedad físico-química	Área geográfica							
	Centro-norte		Centro		Centro-sur		Sur	
	Rango	Media	Rango	Media	Rango	Media	Rango	Media
Arena, %	31.7 - 56.8	50.7a	24.5 - 47.8	34.4b	12.6 - 54.1	31.6b	26.1 - 56.5	36.0b
Limo, %	17.7 - 40.4	29.7b	36.1 - 54.0	44.5a	26.1 - 56.7	40.6a	30.8 - 48.5	42.3a
Arcilla, %	12.1 - 40.2	19.6a	14.1 - 28.1	21.2a	10.1 - 54.9	27.8a	4.6 - 43.1	21.8a
pH (1:2.5 suelo:agua)	7.47 - 8.52	7.86a	5.54 - 8.24	7.03b	5.11 - 6.41	5.94c	5.02 - 6.04	5.54c
MO, g kg ⁻¹	15.3 - 79.3	38.2c	13.8 - 35.0	25.1c	35.6 - 115.0	70.3b	108.4 - 232.2	151.6a
P disponible, mg kg ⁻¹	4.7 - 100.4	40.9a	7.1 - 50.1	20.3b	8.2 - 33.2	19.8b	6.3 - 33.7	20.2b
Ca intercambiable, cmol ⁺ kg ⁻¹	12.1 - 30.0	22.9a	9.5 - 27.2	17.6a	4.2 - 19.1	8.65b	1.1 - 14.5	4.76b
Mg intercambiable, cmol ⁺ kg ⁻¹	1.68 - 6.92	3.25a	1.06 - 3.98	1.84ab	0.35 - 2.44	1.23b	0.20 - 2.68	0.79b
Fe, mg kg ⁻¹	2.9 - 69.7	22.0b	10.8 - 103.3	44.6ab	16.6 - 94.9	39.9ab	24.0 - 101.5	52.0a
Mn, mg kg ⁻¹	7.2 - 27.8	15.0ab	5.8 - 19.3	11.7b	2.0 - 103.1	28.8a	1.4 - 25.6	12.8b
Zn, mg kg ⁻¹	0.3 - 5.6	1.9a	0.4 - 2.7	1.3ab	0.1 - 1.4	0.8b	0.1 - 3.7	0.9b
Cu, mg kg ⁻¹	0.9 - 11.6	5.0ab	4.3 - 171.1	25.5a	0.3 - 3.2	1.9b	0.3 - 3.3	1.7b
Cd, mg kg ⁻¹	0.018 - 0.071	0.041ab	0.034 - 0.152	0.068a	0.011 - 0.049	0.028b	0.010 - 0.102	0.035b

Letras distintas entre medias de una misma fila indican diferencia significativa según test de Tukey (p < 0.05)

El Mn disponible presentó una concentración que fluctuó entre 12 y 29 mg kg⁻¹ dentro de las 4 zonas estudiadas, con una mayor concentración en la zona centro-sur (Figura 2b), que sólo superó a las concentraciones obtenidas en las zonas central y sur (p < 0.05). Estos valores se encuentran dentro del rango de > 1 mg kg⁻¹ señalado como alto para suelos agrícolas en extracciones con DTPA (Havlin et al., 1999). Si bien la disponibilidad de Mn también es afectada por el potencial de reducción presente en suelos de menor pH (Havlin et al., 1999) como los suelos de la zona sur (Tabla 2), la presencia de este elemento está también asociada a la proporción de arcillas cristalinas en el suelo, y una parte importante de los suelos muestreados en la zona centro-sur dentro de este estudio son de origen sedimentario de textura fina, formados por terrazas aluviales (CIREN, 1997; 1999), en tanto que los suelos de la zona sur deben su origen al depósito de cenizas volcánicas, caracterizadas por la presencia de arcillas amorfas (Havlin et al., 1999; Neall, 2006) con menor presencia de Mn respecto de suelos con arcillas cristalinas.

La concentración de Zn disponible fluctuó entre 0.77 y 1.92 mg kg⁻¹ dentro de las 4 zonas estudiadas, con una mayor concentración en la zona centro-norte (Figura 2c), que sólo superó a las concentraciones obtenidas en las zonas centro-sur y sur (p < 0.05). En general, estos valores se encuentran dentro del rango de > 1 mg kg⁻¹ señalado como adecuado a alto para los principales cultivos agrícolas (Havlin et al., 1999), y fueron inferiores a los

valores medios de DTPA-Zn de 40 suelos agrícolas de Italia (Buccolieri et al., 2010), aunque estuvieron dentro del rango de valores señalado por los autores de este estudio. La concentración de Zn presentó una disminución en la medida que se avanzó desde norte a sur dentro de la zona de estudio, lo cual está asociado a la adsorción de Zn a la materia orgánica (MO) del suelo (Havlin et al., 1999), que es mayor en los suelos de la zona centro-sur y sur (Tabla 2) (Luzio, 2010). Cabe destacar que se esperaba una mayor reducción del Zn disponible en los suelos de la zona norte respecto de los suelos localizados en las zonas centro-sur y sur, debido a que el aumento de pH y la presencia de cationes combinados con carbonatos en situaciones de pH mayores a 8.0 (Tabla 2) genera una oxidación del Zn reducido (disponible) (Havlin et al., 1999). Sin embargo, el extractante DTPA logra capturar solo una fracción de Zn mayor a la obtenida con otros reactivos más suaves y que representan a este catión en su fracción inmediatamente disponible (López y Mandado, 2002). Por otra parte, en suelos con mayor concentración de calcio (Ca), como son los de la zona centro y centro-norte, y pH neutro como en la zona centro de Chile (Tabla 2), la concentración de Zn biodisponible incrementa en relación directamente proporcional al incremento de la concentración de Ca, dado que se produce una competencia entre estos dos elementos por los sitios de adsorción en los complejos minerales (Degryse et al., 2009).

El Cu disponible presentó una concentración que fluctuó entre 1.7 y 25.5 mg kg⁻¹ dentro de las 4 zonas estudiadas,

Tabla 3. Rango de valores medios de propiedades físico-químicas seleccionadas para las 4 áreas geográficas estudiadas (20-40 cm).

Propiedad físico-química	Area geográfica							
	Centro-norte		Centro-norte		Centro-norte		Centro-norte	
	Rango	Media	Rango	Media	Rango	Media	Rango	Media
Arena, %	35.4 - 64.5	51.4a	24.1 - 48.8	35.8b	10.4 - 56.1	34.6b	26.6 - 59.5	36.5ab
Limo, %	21.3 - 39.3	29.3b	36.0 - 49.7	43.5a	27.2 - 53.2	40.3a	29.2 - 50.6	41.8a
Arcilla, %	12.0 - 37.2	19.4a	12.0 - 27.9	20.7a	5.7 - 52.1	25.1a	4.6 - 43.7	21.7a
pH (1:2.5 suelo:agua)	7.26 - 8.91	8.06a	5.59 - 8.22	7.03b	4.98 - 6.54	6.04c	5.26 - 6.32	5.61c
MO, g kg ⁻¹	9.1 - 34.5	22.4c	16.4 - 29.4	23.1bc	19.1 - 116.0	54.7b	77.3 - 205.7	125.1a
P disponible, mg kg ⁻¹	1.3 - 60.3	22.6a	4.1 - 37.8	16.2a	2.8 - 27.4	9.2a	3.9 - 27.2	12.7a
Ca intercambiable, cmol ⁺ kg ⁻¹	10.6 - 29.5	21.9a	6.3 - 27.3	17.8a	2.6 - 11.4	7.8b	1.6 - 15.0	4.3b
Mg intercambiable, cmol ⁺ kg ⁻¹	1.43 - 7.81	3.31a	1.10 - 3.63	1.81ab	0.49 - 2.89	1.35b	0.19 - 1.22	0.62b
Fe, mg kg ⁻¹	2.9 - 53.4	14.4b	10.5 - 103.0	45.3a	12.7 - 53.1	28.6ab	19.3 - 93.5	45.0a
Mn, mg kg ⁻¹	4.0 - 18.1	10.0a	6.7 - 23.9	11.8a	0.4 - 39.7	14.2a	1.9 - 27.4	9.4a
Zn, mg kg ⁻¹	0.1 - 5.3	1.2a	0.5 - 2.5	1.2a	0.1 - 1.0	0.5b	0.1 - 1.2	0.5b
Cu, mg kg ⁻¹	1.1 - 10.9	4.0ab	4.3 - 168.5	25.2a	0.1 - 2.8	1.4b	0.2 - 3.3	1.5b
Cd, mg kg ⁻¹	0.010 - 0.065	0.031b	0.034 - 0.152	0.069a	0.002 - 0.041	0.017b	0.005 - 0.038	0.016b

Letras distintas entre medias de una misma fila indican diferencia significativa según test de Tukey (p < 0.05)

cuyo mayor valor fue obtenido en la zona centro (**Figura 2d**), y que sólo superó a las concentraciones obtenidas en las zonas centro-sur y sur ($p < 0.05$). El alto coeficiente de variación (CV) obtenido para este elemento (298%, dato no mostrado) no permitió detectar diferencias entre la zona centro y centro-norte, que cuantitativamente fueron muy diferentes. En general, los valores de los contenidos de Cu disponible se encontraron dentro del rango de $> 0.6 \text{ mg kg}^{-1}$ señalado como alto para suelos agrícolas en extracciones con DTPA (Havlin et al., 1999), y su rango de variación fue similar al señalado por Buccolieri et al. (2010) para su estudio de DTPA-Cu en 40 suelos agrícolas de Italia, donde además señalaron que obtuvieron un alto CV (105%). La alta variabilidad en las concentraciones de Cu total en el suelo ha sido también reportada por Qiao et al. (2011) para suelos de la región noreste de China. La mayor concentración de Cu disponible obtenida en la zona centro del país está asociada a que muchos de los suelos muestreados son de origen sedimentario y formados por fenómenos fluvio-glaciales, cuyos materiales parentales son muy altos en Cu (CIREN, 1996). También hay que señalar que en la precordillera y cordillera de esta zona se desarrolla actividad minera ligada a la extracción de Cu.

La concentración de Cd disponible fluctuó entre 0.03 y 0.07 mg kg^{-1} dentro de las 4 zonas de estudio (**Figura 2e**), y la mayor concentración se obtuvo en la zona centro, que sólo superó a los valores obtenidos en las zonas centro-sur y sur ($p < 0.05$). Los valores medios de Cd disponible en

todas las zonas geográficas fueron en general inferiores a los valores promedios indicados por FangSun et al. (2013) en diferentes regiones de China, pero se encontraron dentro del rango señalado para los suelos analizados por estos autores. La mayor concentración de Cd disponible en la zona centro y centro-norte es explicada por la interrelación de los complejos orgánicos e inorgánicos del suelo que aumentan la disponibilidad de Zn, Cu y Cd, y la competencia por los sitios de adsorción con otros cationes como Ca y magnesio (Mg) (Degryse et al., 2009; Tudoreanu y Phillips, 2004). A su vez es coincidente con la mayor disponibilidad de Cu y Zn (**Figuras 2c y 2d**), y con las mayores concentraciones de Ca y Mg reportadas para estas zonas (**Tabla 2**).

Segunda profundidad (20-40 cm)

Para la segunda profundidad de suelo, la concentración de Fe disponible fluctuó entre 14.2 y 45.0 mg kg^{-1} , y su comportamiento fue similar al obtenido para la primera profundidad de suelo (**Figura 2a**). Las mayores concentraciones se encontraron en las zona centro, centro-sur y sur, aunque solamente las concentraciones de Fe disponible en las zonas centro y sur superaron a la concentración obtenida en la zona centro norte ($p < 0.05$) (**Figura 2a**). Las diferencias de concentración obtenidas para el Fe disponible entre zonas en esta profundidad del suelo obedecen a factores que fueron ya discutidos anteriormente para la primera profundidad de suelo, y que se asocian a las propiedades químicas de los suelos

estudiados (Tabla 2 y 3). En general, la concentración de Fe disponible en la segunda profundidad de suelo fue inferior a la obtenida en la primera profundidad ($p < 0.01$) (Tabla 1, Figura 2a). Esta diferencia de concentración podría obedecer a una mayor acidificación en la capa superior de suelo asociada a la fertilización nitrogenada y acidez fisiológica de las plantas cultivadas, las cuales aumentan la disponibilidad de Fe (Havlin et al., 1999), sin embargo el pH de estos suelos en ambas profundidades, no presentó diferencias al considerar el análisis en toda la zona de este estudio (Tablas 2 y 3). Por tanto, esta diferencia puede obedecer al menor contenido de MO reportada para la segunda profundidad de suelo (Tabla 3), dado que una fuente de reserva importante para el Fe total y disponible del suelo es el contenido de MO (Havlin et al., 1999).

La concentración de Mn disponible fluctuó entre 9.4 y 14.2 mg kg⁻¹ (Figura 2b) y no se encontraron diferencias entre zonas ($p > 0.05$), aunque cuantitativamente la

mayor concentración de Mn disponible se observó en la zona centro-sur al igual que lo obtenido para la primera profundidad (Figura 2b). En general, la concentración de Mn disponible en la segunda profundidad (Figura 2b) fue inferior a la observada en los primeros 20 cm (Figura 2b) ($p < 0.05$). Los factores que afectan esta menor disponibilidad en la segunda profundidad son similares a los que se señalaron para los contenidos de Fe disponible entre profundidades.

La concentración de Zn disponible fluctuó entre 0.45 y 1.21 mg kg⁻¹ (Figura 2c), y su comportamiento fue similar al obtenido para la primera profundidad del suelo, con mayor concentración en las zonas centro-norte y centro, respecto de las otras dos zonas estudiadas ($p < 0.05$). Las diferencias de concentración en el Zn disponible entre las 4 zonas estudiadas para la segunda profundidad obedecen a factores que fueron ya discutidos para la primera profundidad. En general, la concentración de

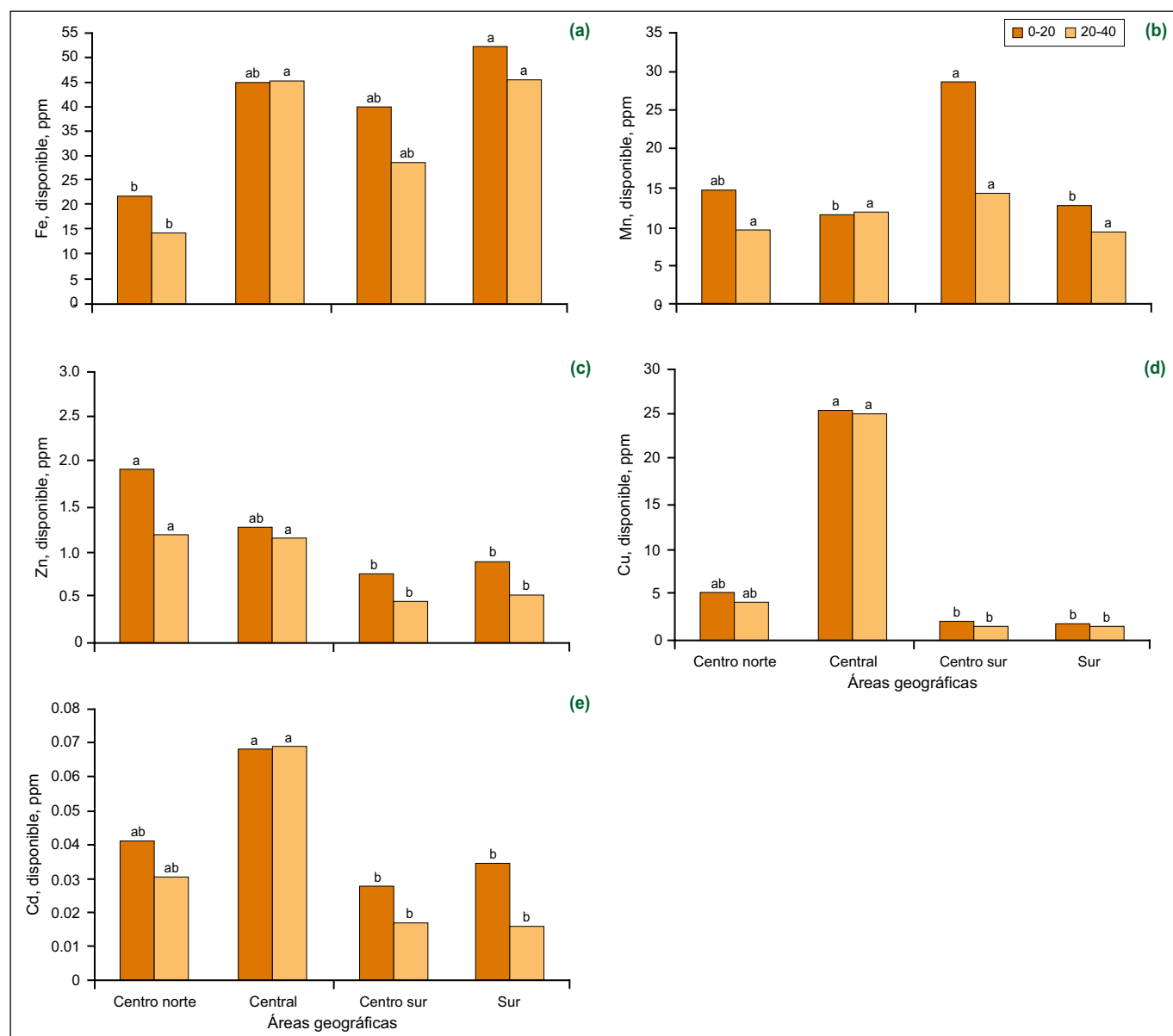


Figura 2. Concentración de metales pesados extraíbles con DTPA en el suelo (0-20 y 20-40 cm) de cuatro áreas geográficas de Chile cultivadas con trigo candeal y maíz; a) hierro, b) manganeso, c) zinc, d) cobre, y e) cadmio. Letras distintas sobre las barras de un mismo estrato de suelo para cada metal indican diferencia estadística entre áreas geográficas según Test de Tukey ($p < 0.05$).

Zn disponible en la segunda capa del suelo fue inferior a la obtenida en la primera ($p < 0.05$) (**Figura 2c**), y los factores que afectan esta menor disponibilidad son los mismos que fueron descritos anteriormente para Fe y Mn. Horckmans et al. (2005) en un estudio realizado con diferentes suelos en Luxemburgo encontraron diferencias en la concentración de Zn total entre profundidades, también con una mayor concentración en la capa superficial del suelo.

Para el Cu disponible, la concentración fluctuó entre 1.4 y 25.2 mg kg⁻¹ (**Figura 2d**), y su comportamiento fue similar al obtenido en la primera profundidad de suelo, con mayor concentración en las zonas centro y centro-norte, respecto de las otras dos zonas estudiadas ($p < 0.05$). Destaca cuantitativamente la concentración de Cu obtenida en la zona centro, cuyas causas fueron ya anteriormente discutidas para la primera profundidad. Se obtuvo también, en esta profundidad un alto CV (313%, datos no mostrados), que enmascaró la diferencia cuantitativa obtenida entre las zonas centro y centro-norte (**Figura 2d**). A diferencia de los elementos Fe, Mn y Zn (**Figuras 2a, 2b y 2c**), hubo una baja diferencia cuantitativa de concentración entre ambas profundidades, aunque con efecto altamente significativo ($p < 0.01$) (**Tabla 1**). Datos similares fueron obtenidos por Horckmans et al. (2005).

La concentración de Cd disponible presentó un comportamiento similar a lo observado en la primera profundidad, con una mayor concentración en la zona central de Chile, que superó a las demás zonas estudiadas ($p < 0.05$) (**Figura 2e**). La concentración de Cd disponible fluctuó entre 0.01 y 0.07 mg kg⁻¹, y el valor medio de concentración de este elemento en esta profundidad fue inferior al observado en la primera profundidad de suelo ($p < 0.01$) (**Tabla 1, Figura 2e**), asociado al bajo movimiento de este elemento en el suelo, como ha sido reportado por Rothbaum et al. (1986) y Horckmans et al. (2005), como también al menor contenido de MO de la segunda estrata de suelo (Tudoreanu y Phillips, 2004) (**Tabla 3**). La mayor concentración de Cd disponible en la capa superior está asociada también a las altas concentraciones de Ca intercambiable y Zn en ambas profundidades (**Tablas 2 y 3, Figura 2c**), situación reportada también por Degryse et al. (2009), y discutida anteriormente.

Conclusión

Las concentraciones extraídas con DTPA de los metales hierro, manganeso, cobre y zinc, considerados como nutrientes esenciales para las plantas, se encontraron dentro del rango adecuado a alto para los principales cultivos agrícolas. Por su parte, la concentración de cadmio, elemento no esencial, se encuentra por debajo del límite considerado crítico para la producción agrícola. Finalmente, todos los metales pesados analizados presentaron un mayor contenido en la primera profundidad del suelo.

Agradecimientos

Este estudio ha sido realizado con el financiamiento del proyecto FONDECYT 1120992 de Chile.

Bibliografía

- Benton, J. 1998. Plant nutrition manual. 149 p. CRC Press LLC, Washington, USA.
- Buccolieri, A., G. Buccolieri, A. Dell'Atti, G. Strisciullo, y R. Gagliano-Candela. 2010. Monitoring of total and bioavailable metals pesados concentration in agricultural soils. *Environ Monit Asses* 168:547-560.
- Cajuste, L., L. Cajuste, C. García, y J. Cruz. 2006. Distribution and availability of metales pesados in raw and acidulated phosphate rock-amended soils. *Com. Soil Sci. Plant Analysis*. 37:2541-2552.
- CIREN. 1996. Estudio Agrológico de la VI Región. Imprenta CIREN CORFO. Santiago, Chile. Tomos I y II. 476 p. Santiago, Chile.
- CIREN. 1997. Estudio Agrológico, VII Región. Descripciones de Suelos. Materiales y Símbolos. Centro de Información de Recursos Naturales. Santiago. Publicación N° 117. 660 p. Santiago, Chile.
- CIREN. 1999. Descripciones de suelos materiales y símbolos: Estudio Agrológico VIII Región. Publicación Ciren N°121. 583 p. Santiago, Chile.
- Degryse, F., E. Smolders, y D.R. Parker. 2009. Partitioning of metals (Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Zn) in soils: concepts, methodologies, prediction and applications – a review. *European Journal of Soil Science* 60:590-612.
- Epstein, E. 1994. Review: The anomaly of silicon in plant biology. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 91:11-17. Retrieved Nov. 11, 2012 from <http://www.pnas.org/content/91/1/11.full.pdf>
- FangSun, F., F. Hua Wang, X. Wang, W. He, D. Wen, Q. Feng Wang, y X. XiangLiu. 2013. Soil threshold values of total and available cadmium for vegetable growing based on field data in Guangdong province, South China. *J Sci Food Agric* 93:1967-1973.
- Glass, A.D.M. 1989. Plant nutrition: An introduction to current concepts. Jones and Bartlett Publishers, Boston, MA. 234 p.
- González, S., R. Ite, y X. Gálvez. 1997. Heavy metals profiles in chilean agricultural soils: a transect from the III region of Atacama to the XI region of Aysén. In: I.K. Iskandar, S.E. Hardy, A.C. Chang, and G.M. Pierzynski (eds). Fourth International Conference on the Biogeomestry of Trace Elements. Extended Abstracts, Berkeley, California. USA. pp. 43-44.
- Graham, R.D., R.M. Welch, D.A. Saunders, I. Ortiz-Monasterio, H.E. Bouis, y M. Bonierbale. 2007. Nutritious subsistence systems. *Adv. Agron.* 92:1-74.
- Grant, C.A., J.M. Clarke, S. Duguid, y R.L. Chaney. 2008. Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation. *Science of the Total Environment*. 390:301-310.

- Havlin, J.L., J.D. Beaton, S. Tisdale, and W.L. Nelson. 1999. Soil fertility and fertilizers. An introduction to nutrient management. 6^a ed. 499 p. Prentice-Hall, New Jersey, North Carolina, USA.
- Hirzel, J., e I. Matus. 2011. Fertilización del cultivo de trigo candeal. Fertilización de Cultivos en Chile. Hirzel, J. (Editor). Colección Libros INIA N°28, Chillán, Chile. 2011. 434 p.
- Horckmans, L., R. Swennen, J. Deckers, y R. Maquil. 2005. Local cack ground concentrations of trace elements in soils: a case study in the Grand Duchy of Luxembourg. *Catena* 59:279-304.
- Kabata-Pendias, A., y H. Pendias. 2001. Trace elements in soils and plants (3rded). Boca Raton:CRC. 671 p.
- Kabata-Pendias, A. 2004. Soil-plant transfer of trace elements-an environmental issue. *Geoderma* 122:143-149.
- Lehoczky, É., y Z. Kiss. 2006. Study of the transfer coefficient of cadmium and lead in ryegrass and lettuce. *Com. Soil Sci. Plant Analysis*. 37:2531-2539.
- Lindsay, W.L., y W.A. Norwell. 1978. Development of DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42:421-428.
- López, P.L., y J.M. Mandado. 2002. Extracciones químicas secuenciales de metales pesados. Aplicación en ciencias geológicas. *Estudios Geol* 58:133-144.
- Luzio, W. 2010. Suelos de Chile. Departamento de Ingeniería y Suelos. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile. 364 p.
- Madrid, F., R. Reinoso, M.C. Florido, E. Díaz Barrientos, F. Ajmone-Marsan, C.M.Davidson y L. Madrid. 2007. Estimating the extractability of potentially toxic metals in urban soils: A comparison of several extracting solutions. *Environmental Pollution* 147:713-722.
- McDowell, R.W, M.D. Taylor, y B.A. Stevenson. 2013. Natural background and anthropogenic contribution of cadmium to New Zealand soils. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 165:80-87.
- Mengel, K., y E.A. Kirkby. 1987. Principles of plant nutrition. Fourth edition. International Potash Institute, Berne, Switzerland. 685 p.
- Neall, V.E. 2006. Volcanic Soils. *Encyclopedia of life supporting systems, EOLSS*. Land use and landcover VII:1-24. On-line www.eolss.net/ebooks/Sample%20Chapters/C19/E1-05-07-13.pdf
- Nicholson, F.A., S.R. Smith, B.J. Alloway, C. Carlton-Smith, y B.J. Chambers. 2003. An inventory of metales pesados inputs to agricultural soils in England and Wales. *The Science of the Total Environment* 311:205-219.
- Qiao, M., C. Cai, Y. Huang, Y. Liu., A. Lin, y Y. Zheng. 2011. Characterization of soil metales pesados contamination and potential health risk in metropolitan region of northern China. *Environ Monit Asses* 172:353-365.
- Rothbaum H. P., R. L. Goguel, A. E. Johnston y G.E.G. Mattingly. 1986. Cadmium accumulation in soils from long continued applications of superphosphate. *Journal of Soil Science* 37: 99-107.
- SAS Institute. 2008. SAS/STAT user's guide, Version 9.2. SAS Inst., Cary, NC.
- Sierra, M., F.J. Martínez, y J. Aguilar. 2007. Baselines for trace elements and evaluation of environmental risk in soils of Almería (SE Spain). *Geoderma* 139:209-219.
- Tudoreanu, L., y C. Phillips. 2004. Empirical models of cadmium accumulation in maize, ryegrass and soya bean plants. *J. Sci. Food Agric.* 84:845-852.
- Villanueva, L. 2003. Evaluación del impacto de los fertilizantes fosfatados en la acumulación de cadmio en suelos cultivados con maíz (*Zea mays* L). Tesis de Magíster en Gestión y Planificación Ambiental. Departamento de Postgrado y Postítulo. Universidad de Chile. 120 p.
- Wong, S.C., X.D. Li, G. Zhang, S.H. Qi, y Y.S. Min. 2002. Heavy metals in agricultural soils of the Pearl River Delta, South China. *Environmental Pollution* 119:33-44.



Trigo candeal en la VIII Región del Bío-bío, Chile