

Estudio prospectivo de las principales propiedades químicas de suelos agrícolas cultivados con trigo candeal y maíz en diferentes zonas de Chile

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

Introducción

Los estudios de las propiedades químicas de suelos agrícolas que representen zonas de gran amplitud se pueden realizar con diferentes fines, como por ejemplo: determinar zonas contaminadas con metales pesados (Buccolieri et al., 2010; Sierra et al., 2007; Qiao et al., 2011); estudios de niveles críticos de nutrientes esenciales para cultivos y praderas (Chen et al., 2003); caracterización de suelos agrícolas o con potencial de uso agrícola (Bourennane et al., 2004; Young et al., 2010); análisis de factores limitantes a la productividad o causantes de problemas en las plantas (Fidanza, 2007); y caracterización química de suelos usados en sistemas pastoriles frente a diferentes tipos de uso de la tierra (Parvage et al., 2013).

Al respecto, para los suelos chilenos no existen estudios agronómicos de amplitud geográfica que caractericen la variabilidad de propiedades químicas asociadas al cultivo de alguna especie en particular, o a la amplitud de posibilidades de cultivos agrícolas, sino más bien estudios de caracterización general de pedones realizados en diferentes áreas del país (CIREN 1996, 1997 y 1999; Luzio, 2010) independientes de las especies agrícolas cultivadas. Por otra parte, estos estudios agronómicos permiten caracterizar condiciones productivas en función de las propiedades químicas del suelo, y asociar dichas propiedades con la respuesta productiva de una especie a la aplicación de nutrientes. Como ejemplo se puede señalar el estudio realizado por Bourennane et al. (2004), en el cual se determinó la relación existente entre el rendimiento del cultivo de trigo y algunas propiedades químicas de diferentes áreas productivas de Francia durante dos temporadas.

Para el caso de Chile se han propuesto algunos sistemas de fertilización que vinculan las propiedades químicas del suelo a la necesidad de fertilización de diferentes cultivos en función de su capacidad productiva, utilizando un modelo de respuesta lineal (Rodríguez, 1993). Sin embargo, algunos estudios han demostrado que si bien las propiedades químicas son importantes para la capacidad productiva (Fernández, 1995; Fernández, 1996), una parte importante de la respuesta o variabilidad del rendimiento está condicionada a las propiedades físicas del suelo (Hirzel y Matus, 2013) y a la variabilidad climática (Cherkasov et al., 2010).

Por su parte, el desarrollo de los cultivos de trigo candeal (*Triticum durum* L.) y maíz en Chile, de alta importancia en la dieta humana y animal de este país, ocupa una extensa área de cultivo que en conjunto comprende un orden

de 1400 km de longitud entre los paralelos 28°5' y 41°2' latitud sur. Esta extensa área geográfica presenta mucha variabilidad de tipos de suelo y propiedades químicas (CIREN 1996, 1997 y 1999; Luzio, 2010), dentro de las cuales se pueden destacar algunas que se traducen en factores limitantes para el cultivo, como la salinidad en la zona centro-norte (Khitrov et al., 2009; Havlin et al., 1999), y bajas concentraciones de P y altas concentraciones de aluminio (Al) en la zona centro-sur y sur (Benton, 1998; Havlin et al., 1999; Mellado, 2007). Por consiguiente, para contribuir al conocimiento de la fertilidad del suelo y de su variabilidad a lo largo de la zona productora de trigo candeal y maíz en Chile, el objetivo del presente estudio fue caracterizar las principales propiedades químicas en cuatro grandes áreas geográficas, evaluando su variabilidad entre las diferentes 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 las siguientes características principales:

- 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.
- 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.

¹ Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Chile. Avenida Vicente Méndez 515, Chillán, Chile. *Correo electrónico: jhirzel@inia.cl

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

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 considerados como parámetro de selección de sitios a muestrear. 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.

Las muestras de suelo fueron secadas al aire, tamizadas por 2 mm y analizadas para pH, materia orgánica (MO), nitrógeno (N) disponible y fósforo (P) extractable, calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K), sodio (Na) y aluminio (Al) de intercambio de acuerdo a la metodología señalada por Sadzawka et al. (2006), en el laboratorio de análisis de suelo del Instituto de Investigaciones Agropecuarias de Chile, ciudad de Chillán. El pH del suelo fue determinado en relación suelo:agua 1:2.5 usando pH-metro. La MO del suelo fue medida usando el método de digestión húmeda de Walkley-Black. El N disponible ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$)

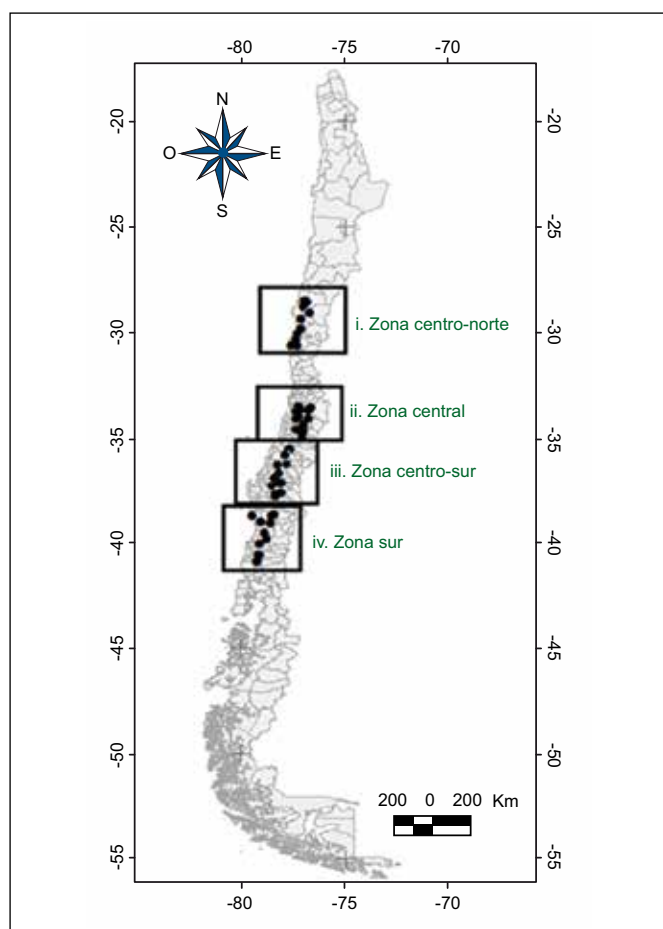


Figura 1. Zonas de muestreo a lo largo del valle central de riego de Chile.

fue extraído con KCl 2M y determinado por colorimetría en un auto-analizador Skalar (espectrofotómetro de flujo segmentado). El P extractable (Olsen) fue determinado con NaHCO_3 0.5M y ácido molibdato ascórbico. Los cationes de intercambio fueron determinados con extracción por Acetato de Amonio 1M a través de espectroscopía de llama con absorción atómica para Ca y Mg, y emisión atómica para K y Na. El Al intercambiable fue determinado por extracción con KCl 1M usando espectroscopía de absorción atómica. Los resultados analíticos fueron evaluados estadísticamente 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 subparcela a la profundidad de muestreo. Se realizó análisis de varianza y test de medias Tukey ($p=0.05$) usando el procedimiento estadístico GLM de SAS (SAS, 1989).

Resultados y discusión

Todos los parámetros evaluados en el suelo fueron significativamente diferentes entre áreas geográficas, en tanto que, independientemente del sitio, la profundidad del suelo tuvo efecto significativo para el contenido de MO, y las concentraciones de N disponible y P extractable, y K intercambiable ($p<0.01$) (Tabla 1). Por su parte, la interacción entre el área geográfica y la profundidad del suelo no presentó efectos significativos en ninguno de los parámetros evaluados ($p>0.05$) (Tabla 1). El análisis de los resultados por profundidad de suelo se presenta a continuación.

Primer estrato del suelo (0-20 cm)

Para la primera profundidad del suelo, el pH presentó una disminución desde norte a sur dentro de la zona de estudio (Figura 2a) fluctuando entre 7.9 y 5.7, siendo el mayor valor el de la zona centro-norte y el menor valor el obtenido en la zona sur ($p<0.05$). La zona centro-norte muestra diferencias significativas con el resto de las zonas estudiadas, mientras que las zonas centro-sur y sur no presentaron diferencias significativas entre ellas ($p>0.05$). Estos valores de pH se encuentran dentro del rango levemente ácido a básico, con limitaciones en dos de las zonas geográficas estudiadas según los rangos considerados como adecuados para plantas cultivadas (Etchevers y Padilla, 2007). Una situación similar ha sido indicada por estudios previos de caracterización parcial dentro de estas zonas geográficas (CIREN 1996, 1997 y 1999; Luzio, 2010; Stolpe, 2006), con la diferencia que el pH en la zona sur es menor en estos estudios previos, lo cual se explica porque las siembras de trigo y maíz en la zona sur están acompañadas de la práctica de encalado frecuente para corregir limitaciones de acidez y Al con el objeto de potenciar el rendimiento de los cultivos.

El contenido de MO, presentó un comportamiento opuesto al observado para el pH (Figura 2b), aumentando de valor desde norte a sur, asociado a las diferencias de pluviometría y temperaturas ambientales de cada zona geográfica, dado que la mineralización de la MO es acelerada por el aumento de temperatura del suelo,

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

Fuente de variación	Área geográfica (A)	Profundidad del suelo (P)	Interacción (A*P)
pH	*†	NS	NS
Materia orgánica	**	**	NS
Nitrógeno disponible	*	**	NS
Fósforo extractable	**	**	NS
Calcio intercambiable	**	NS	NS
Magnesio intercambiable	**	NS	NS
Potasio intercambiable	**	**	NS
Sodio intercambiable	**	NS	NS
Aluminio intercambiable	**	NS	NS

† Donde *, ** y NS indican diferencias significativas a un nivel de probabilidad de 0.05, de 0.01, y no significativo, respectivamente.

situación que acelera la reducción de MO en las zonas centro-norte y centro, y en condiciones de mayor pluviometría se genera una considerable producción de masa vegetal, que sumada a una menor temperatura de suelo contribuye al aumento de MO en el suelo (Havlin et al., 1999; Jenkinson y Rayner, 1977). El mayor contenido de MO se presentó en la zona sur ($p < 0.05$), seguido de la zona centro-sur ($p < 0.05$), y luego por las zonas centro y centro-norte, sin diferencias significativas entre éstas dos últimas zonas geográficas ($p > 0.05$). Los valores obtenidos son similares a los hallados por CIREN (1996, 1997 y 1999), Luzio (2010) y Stolpe (2006) en estudios parciales realizados previamente. Los contenidos de MO en el presente estudio fluctuaron entre 25.1 y 142.5 g kg⁻¹, mientras que los valores de MO en los suelos volcánicos (zonas centro-sur y sur) oscilaron entre 70.3 y 142.5 g kg⁻¹. Estos valores relativamente altos (Etchevers y Padilla, 2007) son considerados valores normales para suelos de origen volcánico (Neall, 2006).

El contenido de N disponible sólo presentó diferencias significativas entre la zona centro sur y centro ($p < 0.05$). El mayor valor se obtuvo en la zona centro-sur (**Figura 2c**), asociado al mayor contenido de MO y a su mineralización (Havlin et al., 1999). La concentración de N disponible fluctuó entre 25 y 45 mg kg⁻¹ dentro de las cuatro zonas geográficas evaluadas, cuyos valores en general se consideran adecuados para la mayoría de los cultivos agrícolas (Etchevers y Padilla, 2007).

La concentración de P extractable dentro de las 4 zonas geográficas fluctuó entre 19.8 y 40.9 mg kg⁻¹, siendo la zona centro-norte la que presentó el mayor valor, diferenciándose de forma significativa del resto de las zonas estudiadas ($p < 0.05$), las cuales no presentaron diferencias significativas entre ellas ($p > 0.05$) (**Figura 2d**). Estas concentraciones se encontraron dentro del rango adecuado (zonas centro, centro-sur y sur) a alto (zona centro-norte) para suelos agrícolas (Etchevers y Padilla,

2007), y fueron inferiores a la media y al rango de concentración de P Olsen registradas por Chen et al. (2003) para suelos cultivados con praderas en Nueva Zelanda. En general, las diferencias entre las concentraciones de P extractable obedecen a los procesos de fijación de este elemento en el suelo, con diferencias de magnitud asociados a las propiedades de cada suelo; como el pH, concentración de bases, Al y contenido de MO (Barreal et al., 2001; Chen et al., 2003; Havlin et al., 1999; Haynes and Mokolobate, 2001). De esta forma, los suelos volcánicos presentan mayor fijación de P y por tanto menores concentraciones de P extractable, a diferencia de los suelos de la zona centro norte y central (origen aluvial, lacustre y transición). No obstante, se esperaba encontrar todavía una menor concentración de P extractable en los suelos de la zona centro sur y sur, asociado a sus propiedades específicas (suelos volcánicos). Este hecho puede explicarse por los sistemas utilizados para calcular la dosis de P necesarias para los cultivos de maíz y trigo en esas zonas del país durante los últimos 20 años (Rodríguez, 1993), las cuales podrían haber sobre estimado las necesidades de P del cultivo, y generado una acumulación de este nutriente en el suelo.

Las concentraciones de Ca, Mg y Na en el suelo se encontraron dentro del rango descrito por los estudios parciales previos (CIREN 1996, 1997 y 1999; Luzio, 2010), y presentaron una disminución paulatina desde norte a sur dentro de la zona de estudio (**Figuras 2e, f y g**), los datos obtenidos están asociados al aumento de pluviometría en el mismo orden (Havlin et al., 1999). Un comportamiento similar se presentó en el pH del suelo (**Figura 2a**), dada la estrecha relación entre este parámetro y la concentración de bases en el suelo (Havlin et al., 1999).

La concentración de Ca intercambiable desde norte a sur fluctuó entre 22.9 y 5.2 cmol_c kg⁻¹, y los mayores valores se presentaron en la zona centro-norte y centro, los cuales fueron diferentes significativamente a las otras dos zonas estudiadas ($p < 0.05$). Mientras que los valores obtenidos en las zonas centro-sur y sur no presentaron diferencias significativas entre ellas (**Figura 2e**). Las concentraciones de Ca en el suelo obtenidas en este estudio se pueden considerar dentro del rango adecuado (zonas centro-sur y sur) a muy alto (zonas centro y centro-norte) para suelos agrícolas (Etchevers y Padilla, 2007). Un rango similar de concentración de Ca para las zonas centro-sur y sur fue señalado por Officer et al. (2004) para suelos agrícolas de Illinois y Missouri en EE.UU.

Respecto al Mg intercambiable (**Figura 2f**), las concentraciones fluctuaron entre 3.3 y 0.8 cmol_c kg⁻¹, consideradas dentro del rango adecuado a alto para suelos agrícolas (Etchevers y Padilla, 2007). La mayor concentración obtenida se presentó en la zona centro-norte, que se diferencia significativamente del resto de las zonas ($p < 0.05$), en tanto que las concentraciones de estas últimas zonas no presentaron diferencias significativas

($p > 0.05$) entre ellas. Esta ausencia de diferencias entre zonas que presentan cuantitativamente una gran diferencia de concentración (zona centro y sur) (**Figura 2f**) obedece al alto coeficiente de variación obtenido para este elemento (64.4%), debido principalmente a las diferencias en la génesis de los suelos presentes en una misma zona geográfica (Luzio, 2010). El rango de concentración de Mg encontrado en toda la zona de estudio fue similar al señalado por Officer et al. (2004).

La concentración de Na intercambiable fluctuó entre 1.29 y 0.10 $\text{cmol}_+ \text{kg}^{-1}$ desde la zona centro-norte hacia el sur (**Figura 2g**), y la mayor concentración se obtuvo en la zona centro norte, la cual se diferencia de forma significativa de las otras tres zonas ($p < 0.05$), no obteniéndose diferencias significativas ($p > 0.05$) entre ellas. La concentración de Na encontrada en la zona centro-norte se encuentra dentro del rango alto señalado para suelos agrícolas (Etchevers y Padilla, 2007), e incluso se traduce en riesgo de sodicidad que puede afectar negativamente la productividad de las plantas (Benton, 1998; Havlin et al., 1999).

Los valores de la concentración de K intercambiable, fluctuaron entre 0.49 y 0.76 $\text{cmol}_+ \text{kg}^{-1}$ y se encuentran dentro del rango adecuado a alto señalado para suelos agrícolas (Etchevers y Padilla, 2007). Con respecto a las zonas geográficas se observa que las zonas centro-norte y centro-sur presentan los mayores contenidos de K intercambiable, los cuales se diferencian de forma significativa solo con la zona centro ($p < 0.05$) (**Figura 2h**). Valores similares son señalados por estudios parciales previos (CIREN 1996, 1997 y 1999; Luzio, 2010), y obedecen a la génesis de suelo, mayor potencial de rendimiento y extracción de K en el cultivo de maíz de la zona central, y al K aplicado como fertilizante en estos suelos (Havlin et al., 1999). A su vez, este rango de concentración de K es mayor al señalado por Officer et al. (2004) para suelos agrícolas de Illinois y Missouri.

Los contenidos de Al intercambiable fluctuaron entre 0.02 y 0.51 $\text{cmol}_+ \text{kg}^{-1}$ (**Figura 2i**) y se encuentran dentro de los límites considerados como adecuado a alto para suelos agrícolas (Etchevers y Padilla, 2007). Los valores obtenidos coinciden con los descritos en los estudios parciales previos (CIREN 1996, 1997 y 1999; Luzio, 2010). Como era de esperar, la mayor concentración de Al se obtuvo en la zona sur cuyos valores fueron significativamente diferentes ($p < 0.05$) a los obtenidos en el resto de las zonas estudiadas. Estas zonas, a pesar de tener valores de Al intercambiable muy diferentes entre ellas, no presentaron diferencias significativas entre sí ($p > 0.05$). La mayor concentración de Al en la zona sur obedece a la mayor pluviometría de esta zona (lixiviación de cationes de reacción básica) y a las propiedades ándicas del suelo, donde destaca la mayor presencia de Al asociado a la MO y las arcillas amorfas (Alofanos e Imogolita) (Havlin et al., 1999; Neall, 2006).

Segundo estrato del suelo (20-40 cm)

Para la segunda capa de suelo, los valores de pH obtenidos (**Figura 2a**) presentaron el mismo comportamiento

descrito para los primeros 20 cm dentro de las zonas geográficas de estudio (**Figura 2a**). Los valores de pH en la segunda profundidad fluctuaron entre 5.7 y 8.1. Tampoco se obtuvieron diferencias significativas en los pH entre ambas profundidades (**Tabla 1**). La explicación de las diferencias en el pH obtenidas entre zonas geográficas para esta segunda capa sería la misma que se ha mencionado anteriormente al analizar de los valores de la primera capa.

El contenido de MO en la segunda profundidad del suelo (**Figura 2b**) también presentó el mismo comportamiento que se obtuvo en la primera profundidad y puede aplicarse la misma discusión que se dio para la **Figura 2b**. Los contenidos obtenidos, para esta segunda capa, fluctuaron entre 22.0 y 114.6 g kg^{-1} para la zona centro-norte y la zona sur respectivamente. Para los suelos volcánicos, los contenidos de MO fluctuaron entre 54.7 y 114.6 g kg^{-1} (zona centro-sur y sur, respectivamente). Para toda las zonas de estudio se obtuvo un significativo y menor contenido de MO en la segunda capa de suelo respecto de la primera ($p < 0.01$) (**Tabla 1**), lo cual responde a la continua generación y aportes de carbono orgánico en superficie (Havlin et al., 1999). El contenido de N disponible en la segunda capa del suelo presentó un comportamiento parecido al obtenido y descrito para la primera capa (**Figura 2c**), sin embargo en la segunda profundidad no se obtuvieron diferencias significativas entre zonas geográficas ($p > 0.05$). Los valores de N disponible fluctuaron entre 20 y 26 mg kg^{-1} dentro de las cuatro zonas geográficas evaluadas, y fueron significativamente inferiores a los valores obtenidos para la primera capa del suelo ($p < 0.01$) (**Tabla 1**). Esta menor concentración de N en la segunda capa analizada está asociada al menor contenido de MO, dado que la principal fuente de aporte de N disponible en el suelo proviene de la mineralización de la MO del suelo (Havlin et al., 1999).

Los niveles de P extractable fluctuaron entre 9.2 y 23.0 mg kg^{-1} (**Figura 2d**), observándose un efecto similar al obtenido y descrito en la primera capa del suelo (**Figura 2d**), pero en este caso (20-40 cm) sólo se obtuvo diferencia significativa entre la zona centro norte y centro sur ($p < 0.05$), con mayor valor en la zona centro norte. Al igual que lo que se observó para el N, en esta profundidad, el contenido de P extractable dentro de las zonas de estudio fue significativamente inferior al obtenido para la primera capa del suelo ($p < 0.01$) (**Tabla 1**), lo cual se asocia al menor contenido de MO en profundidad, dado que gran parte del P que se hace disponible en el suelo está presente en forma orgánica (Chen et al., 2003; Havlin et al., 1999), y al hecho de que cuando se fertiliza con P, este se mantiene en los primeros 20 cm, dado el poco movimiento de este nutriente en el suelo (Havlin et al., 1999).

Los contenidos de los elementos Ca, Mg, Na, K y Al intercambiable presentaron el mismo comportamiento observado y discutido para la capa superior del suelo (**Figuras 2e, 2f, 2g, 2h, 2i**, respectivamente). Los valores de Ca, Mg, Na, K y Al intercambiable fluctuaron entre 4.8-22.0, 0.6-3.3, 0.08-1.30, 0.36-0.70, y 0.02-0.62 cmol_+

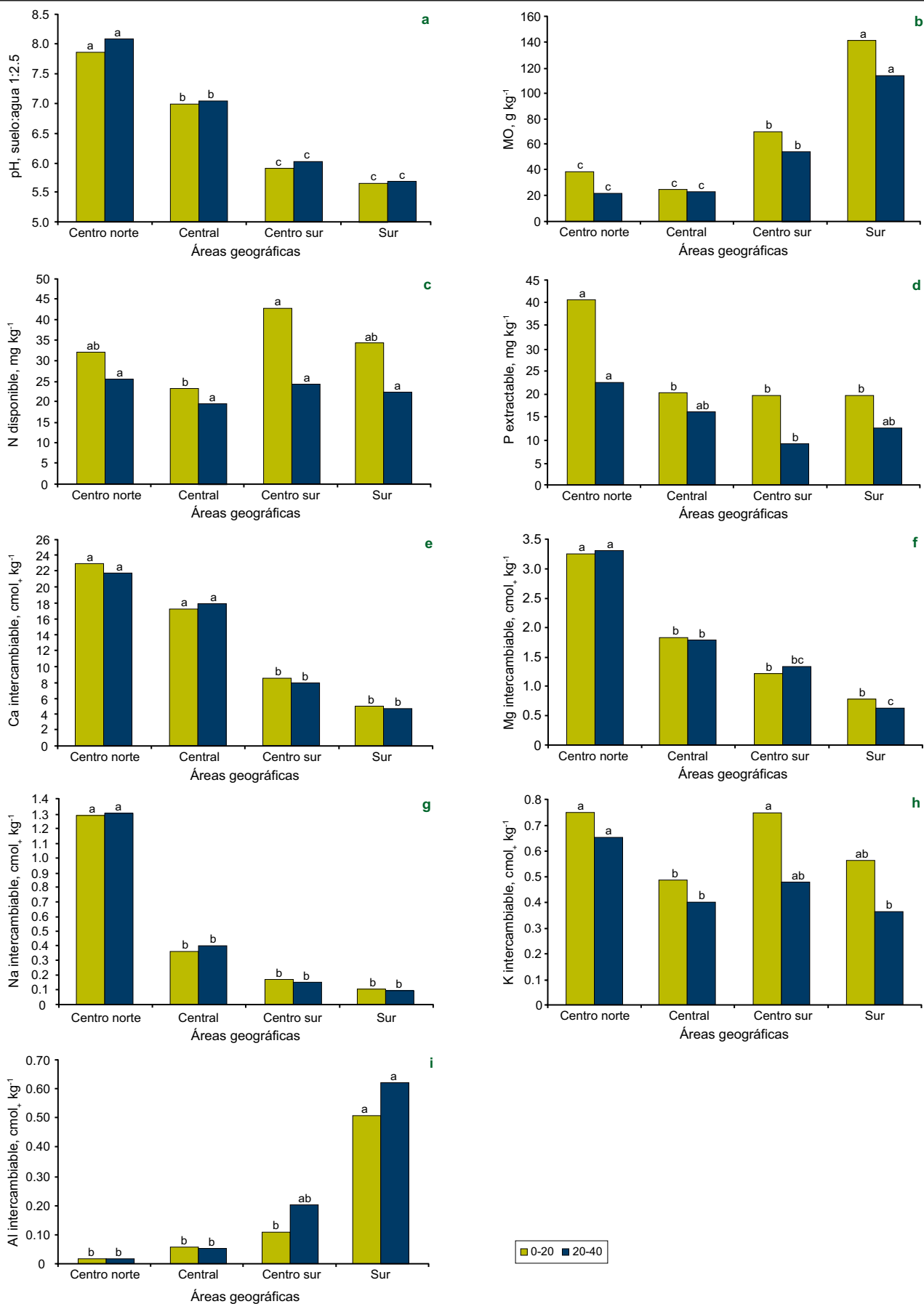


Figura 2. Propiedades químicas de suelo (0-20 y 20-40 cm) de cuatro áreas geográficas de Chile cultivadas con trigo candeal y maíz; a) pH, b) materia orgánica, c) nitrógeno disponible, d) fósforo extractable, e) calcio intercambiable, f) magnesio intercambiable, g) sodio intercambiable, h) potasio intercambiable, e i) aluminio intercambiable. Letras distintas sobre las barras de un mismo estrato de suelo para cada propiedad química analizada indican diferencia estadística entre áreas geográficas según Test de Tukey ($p < 0.05$).

kg⁻¹, respectivamente. Las concentraciones de Ca, Mg, Na y Al en la segunda profundidad dentro de las zonas estudio fueron similares a lo obtenido en los primeros 20 cm, no obteniéndose diferencias significativas entre ambas capas del suelo ($p > 0.05$) (**Tabla 1**). Este hecho está asociado a la génesis de suelos; con alta concentración de bases en todo el perfil en zonas de menor pluviometría; y al movimiento de cationes en las zonas con mayor pluviometría donde se realiza su aplicación a través de fertilización o de enmiendas para corregir acidez (Havlin et al., 1999). Concentraciones similares de Ca, Mg y Na en diferentes capas de suelo han sido reportadas también por Zaidel'man et al. (2007) para suelos de Rusia. La concentración de K fue inferior en la segunda profundidad de suelo respecto a la primera ($p < 0.01$), asociado a las prácticas de fertilización con este elemento, la cual tiende a generar estratificación del nutriente en la parte superior del suelo (Havlin et al., 1999).

Conclusión

Los suelos chilenos cultivados con trigo y maíz desde la zona centro norte hasta el sur mostraron diferencias significativas entre las propiedades químicas evaluadas (pH, MO, N disponible y P extractable, Ca, Mg, K, Na y Al intercambiable). La mayoría de estas propiedades se encuentran dentro del rango adecuado a alto para los principales cultivos agrícolas, y sólo el pH y las concentraciones de Na y Al intercambiable podrían ser limitantes en algunas de las zonas geográficas estudiadas. Por su parte, la profundidad del suelo en la cual cada propiedad química fue analizada, generó diferencias en los contenidos de los siguientes parámetros: MO, N disponible, P extractable y K intercambiable, cuyos mayores valores fueron encontrados en la primera capa del suelo (0-20cm).

Agradecimientos

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

Bibliografía

- Barreal, M.E., M. Camps Arbustain, F. Macías, y A.E. Fertita. 2001. Phosphate and sulfate retention by nonvolcanic soils with andic properties. *Soil Science*, 166(10):691-707.
- Benton, J. 1998. *Plant nutrition manual*. CRC Press LLC, Washington, USA. 149 p.
- Bourennane, H., B. Nicoullaud, A. Couturier, y D. King. 2004. Exploring the spatial relationships between some soil properties and wheat yields in two soil types. *Precision Agriculture* 5:521-536.
- Buccolieri, A., G. Buccolieri, A. Dell'Atti, G. Strisciullo, y R. Gagliano-Candela. 2010. Monitoring of total and bioavailable heavy metals concentration in agricultural soils. *Environ Monit Asses* 168:547-560.
- Chen, C., S. Sinaj, L. Condrón, E. Frossard, R. Sherlock, y M. Davis. 2003. Characterization of phosphorus availability in selected New Zealand grassland soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 65:89-100.
- Cherkasov, G.N., N.S. Sokoroev, A.N. Voronin, y S.V. Trapeznikov. 2010. Effect of weather conditions on soil fertility, crop yield, and fertilizer efficiency in the Central Chernozem Zone. *Russian Agricultural Sciences*, 36(5):353-355.
- CIREN. 1996. *Estudio Agrológico de la VI Región*. Imprenta CIREN CORFO. Santiago, Chile. Tomos I y II. 476 p.
- CIREN. 1997. *Estudio Agrológico, VII Región*. Descripciones de Suelos. Materiales y Símbolos. Centro de Información de Recursos Naturales. Santiago, Chile. Publicación N° 117. 660 p.

- CIREN. 1999. *Descripciones de suelos materiales y símbolos: Estudio Agrológico VIII Reg*. Publicación Ciren N°121. 583 p. Santiago, Chile.
- Etchevers, J., y J. Padilla. 2007. Diagnóstico de la fertilidad del suelo. *En Alcantar, G., y L. Trejo-Téllez (Eds.)*. Nutrición de cultivos. Ediciones Mundi-Prensa, México. 454 p.
- Fernández, M. 1995. Fertilización nitrogenada y su eficiencia en maíz de grano. *Simiente* 65:122-132.
- Fernández, M. 1996. Influencia de la fertilización de largo plazo en el cultivo de maíz y en la residualidad de P y K en un Mollisol calcáreo. *Agricultura Técnica, Chile*. 56:107-115.
- Fidanza, M. 2007. Characterization of soil properties associated with type-I fairy ring symptoms in turfgrass. *Biologia, Bratislava* 62:533-536.
- Havlin, J.L., J.D. Beaton, S. Tisdale, y W.L. Nelson. 1999. *Soil fertility and fertilizers. An introduction to nutrient management*. 6ª Ed. Prentice-Hall, New Jersey, North Carolina, USA. 499 p.
- Haynes, R.J. and M.S. Mokolobate. 2001. Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: a critical review of the phenomenon and the mechanisms involved. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 59:47-63.
- Hirzel, J., y I. Matus. 2013. Effect of soil depth and increasing fertilization rate on yield and its components of two durum wheat varieties. *Chilean J. Agric. Res* 73:55-59.
- Jenkinson, D. S., y J. H. Rayner. 1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Science* 123:298-305.
- Khitrov, N., D. Rukhovivh, N. Kalinina, A. Novikova, E. Pankova, y G. Chernousenko. 2009. Estimation of the areas of salt-affected soils in European part of Russia on the basis of a digital map of soil salinization on scale of 1:2.5 M. *Eurasian Soil Science* 42:581-590.
- Luzio, W. 2010. *Suelos de Chile*. Departamento de Ingeniería y Suelos. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile. 364 p.
- Mellado, M. 2007. *El trigo en Chile*. Cultura, Ciencia y Tecnología. Colección Libros INIA 21. 684 p.
- Neall, V.E. 2006. Volcanic Soils. *Encyclopedia of life supporting systems, EOLSS. Land use and land cover VII:1-24*. On-line www.eolss.net/ebooks/Sample%20Chapters/C19/E1-05-07-13.pdf
- Officer, S., A. Kravchenko, G. Bollero, K. Sudduth, N. Kitchen, W. Wiebold, H. Palm, y D. Bullock. 2004. Relationships between soil bulk electrical conductivity and the principal component analysis of topography and soil fertility values. *Plant and Soil* 258:269-280.
- Parvage, M., B. Ulén, y H. Kirchmann. 2013. A survey of soil phosphorus and nitrogen in Swedish horse paddocks. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 178:1-9.
- Qiao, M., C. Cai, Y. Huang, Y. Liu., A. Lin, e Y. Zheng. 2011. Characterization of soil heavy metal contamination and potential health risk in metropolitan region of northern China. *Environ Monit Asses* 172:353-365.
- Rodríguez, J. 1993. *La fertilización de los cultivos*. Pontificia Universidad Católica de Chile. Facultad de Agronomía. Santiago. Colección en Agricultura. 291 p.
- Sadzawka, A., R. Grez, M.L. Mora, N.R. Saavedra, M.A. Carrasco, y C.W. Rojas. 2006. *Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile*. Revisión 2006. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Serie Actas INIA N°34, Santiago, Chile.
- 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.
- Stolpe, N. 2006. *Descripciones de los Principales Suelos de la VIII Región de Chile*. Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Universidad de Concepción, Chile. 84 p.
- Young, S., M. Wilson, S. Hillier, E. Delbos, S. Ali, y R. Stoltzfus. 2010. Differences and commonalities in physical, chemical and mineralogical properties of Zanzibari geophagic soil. *J. Chem Ecol* 36:129-140.
- Zaidel'man, F.R., A.S. Nikiforova, L.V. Stepantsova, S.B. Safronov, y V.N. Krasin. 2007. Chemical properties of soils in closed depressions of the northern Tambov plain. *Moscow University Soil Science Bulletin* 62:200-207. ✪