

ESTUDIO DE LA CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE BORO DISPONIBLE EN SUELOS MEDIANTE MEMBRANAS FUNCIONALES CON CADENAS DE POLIOLES

STUDY OF AVAILABLE BORON RETENTION CAPACITY IN SOILS BY FUNCTIONAL MEMBRANES WITH POLYOL CHAINS

Myleidi Vera¹, Enrique M. Combatt², Manuel S. Palencia^{3*}

Recibido para publicación: Enero 21 de 2014 - Aceptado para publicación: Mayo 5 de 2014

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue estudiar la capacidad de retención de boro disponible por parte de membranas funcionales basadas en N-metil-D-glucamina a partir de extractos acuosos de muestras de suelos, empleando el método del agua caliente. Para ello, membranas con capacidad de retención de boro fueron fabricadas mediante redes poliméricas interpenetrantes y evaluadas frente a diferentes ambientes químicos (soluciones de ácido bórico con diferentes valores de pH: 5,0, 7,0 y 9,0 y extractos acuosos obtenidos por el método del agua caliente de tres suelos con diferente acidez). Se concluyó que la capacidad de retención de estas membranas es función del contenido de grupos -OH incorporados y se ve afectada fuertemente por el pH, la presencia de Al³⁺ y en menor grado por la presencia de especies iónicas. Los resultados sugieren que estos materiales pueden ser empleados potencialmente para la correlación de los contenidos de boro, de un determinado cultivos en condiciones ideales de campo, con la respuesta analítica medida a nivel de laboratorio.

Palabras clave: N-metil-D-glucamina, capacidad máxima de retención

ABSTRACT

The objective of this work was to study the phytoavailable boron retention capacity by functional membranes, based in N-methyl-D-glucamine, from aqueous extracts of soil samples using the hot water method. For that, membranes with boron retention capacity were constructed via interpenetrating polymer networks and evaluated at different chemical environment (boric acid solutions at different values of pH: 5.0, 7.0 and 9.0 and aqueous extracts by hot water method from three soils with different acidity). It was concluded that retention capacity of membranes is function of groups -OH added and is affected strongly by pH, presence of Al³⁺ and weakly by ionic species. Results suggest that these materials can be used potentially for correlation of boron contents, of crops in ideal field conditions, with analytical response obtained at laboratory level.

Key words: N-methyl-D-glucamine, maximum retention capacity

¹ Químico, Universidad del Valle, Cali, Colombia

² Departamento de Ingeniería Agronómica y Desarrollo Rural, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia

^{3*} Departamento de Química, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad del Valle, Cali, Colombia. Calle 13 N° 100-00, Edif. 320 Ofic. 2063 Sede Melendez. (57-2) 3212180, Fax 3212128, manuel.palencia@correounivalle.edu.co

INTRODUCCIÓN

El boro es un elemento químico que se encuentra ampliamente distribuido en la biosfera usualmente en forma de H_3BO_3 y otras especies asociadas al borato. En el suelo su concentración y distribución varía ampliamente dependiendo de las propiedades físicas, químicas y microbiológicas presentes (Shibli y Srebnik 2005; Ahmad et al. 2012; Aubert y Pinta 1977; Reid 2010). Aunque el boro es un elemento esencial para la nutrición y crecimiento de las especies vegetales, en una concentración excesiva produce efectos negativos en las plantas, disminuyendo el rendimiento de la producción de los cultivos y afectando inevitablemente diversos sectores de la economía agraria (Ahmad et al. 2012; Reid 2010).

El correcto diagnóstico de los niveles de boro disponible en los suelos se encuentra estrechamente relacionado con las técnicas adecuadas de fertilización, por ello, resulta sumamente importante que los métodos de determinación de boro disponible sean exactos y representativos de su disponibilidad real para los cultivos (Handreck 1990). En la actualidad, la determinación de los contenidos de boro disponible en suelos se realiza utilizando soluciones extractoras que buscan imitar la acción de las raíces en condiciones de laboratorio. No obstante, estos métodos generalmente sobre estiman o subvaloran el valor real, ya que la cantidad de boro disponible depende de distintos factores como el pH, la temperatura, el contenido de humedad, entre otros (Navarro y Navarro 2003; Ahmad et al. 2012).

En la actualidad, la mejor estrategia para la determinación de los niveles de disponibilidad de boro en el suelo es la correlación de los resultados analíticos de laboratorio con la respuesta de los cultivos. Estos estudios de correlación se efectúan en condiciones controladas que permiten contrastar la respuesta del método de extracción con la condición real de una planta patrón (Shibli y Srebnik 2005; Steinfeld et al. 2006; Chaudhary y Shukla 2004). Sin embargo, para especies vegetales diferentes los requerimientos de boro pueden variar ampliamente.

Una clasificación de los cultivos en función de su tolerancia al boro es la denominación de estos como cultivos sensibles (por ej., manzano, naranjo, limonero, aguacate), cultivos semisensibles (por ej., cebada, repollo, lechuga, tomate, tabaco) y cultivos tolerantes (por ej., algodón, remolacha, pepino, tulipán) (Blevins y Lukaszewski 1998; Navarro y Navarro 2003).

El método de extracción de boro en los suelos más empleado es el de agua caliente; sin embargo, debido a que la fitodisponibilidad del boro en el suelo varía con la temperatura, es claro que la cantidad de boro extraída es sobre estimada por este método (Navarro y Navarro 2003; Polat et al. 2004). Otro inconveniente ligado a la determinación de boro es la coloración del extracto acuoso obtenido. Este color es resultado de la presencia de altos contenidos de materia orgánica en las muestras de suelo; como consecuencia, la cuantificación espectrofotométrica se ve afectada y aunque se han realizado propuestas para la decoloración de estas soluciones mediante el uso de carbón activado, es posible inferir que los tratamientos con carbón vegetal pueden disminuir la

cantidad de boro presente en las muestras como resultado de la adsorción superficial de este (McGreehan et al. 1989). Paralelo al método del agua caliente, han surgido otros como la extracción con HCl, con acetato de amonio a pH 7, la extracción con sorbitol y modificaciones que incluye adición de soluciones de BaCl₂ y CaCl₂ (Bonilla y Bolaños, 2009; Polat et al. 2004; McGreehan et al. 1989). Comúnmente, posterior a la extracción, la cuantificación de boro se realiza mediante técnicas espectrofotométricas. En particular, la cuantificación por espectrofotometría UV-vis es fiable, rápida, sencilla y sensible. Los métodos espectrofotométricos variarán según el reactivo que se emplee para la formación del complejo coloreado o fluorescente con boro. Los reactivos más utilizados son: la curcumina, el azul de metileno, quinalizarina, el cristal violeta, ácido cromotrópico, ácido carmínico y azometina-H (Roig-Navarro et al. 1996; Sah y Brown 1997).

Una estrategia para la determinación de boro disponible es el empleo de materiales poliméricos funcionales (Ulbricht 2006; Rivas et al. 2011; Lvov 2013; Agarwal et al. 2013). Mediante el adecuado control de la arquitectura molecular, estos materiales pueden ser diseñados para retener la cantidad de boro requerida por un cultivo en particular, y posteriormente servir de control frente a los valores arrojados por un método de extracción. Sin embargo, como etapa previa a su calibración, es necesario determinar cómo las condiciones propias de los suelos (pH, contenido de materia orgánica, bases intercambiables, textura, etc.) afectan la capacidad de retención de boro por parte del material, ya que en últimas estas condiciones serán sus condiciones reales de operación.

Recientemente, se reportó la construcción de membranas funcionales con capacidad de retención de boro mediante redes poliméricas interpenetrantes y basadas en N-metil-D-glucamina (Palencia et al. 2014). Debido a la capacidad de retención de boro de estas membranas, como resultado de las cadenas polihidroxiladas presentes en su estructura, ellas podrían ser empleadas como potenciales soportes para la codificación química de la información nutricional de cultivos de importancia agrícola, siempre que sea posible el control y diseño de las propiedades químicas del material. Así, el objetivo del presente trabajo fue estudiar la capacidad de retención de boro disponible por parte de membranas funcionales basadas en N-metil-D-glucamina a partir de extractos acuosos de muestras de suelos empleando el método del agua caliente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Fabricación del material retenedor de boro

La fabricación de las membranas se realizó mediante redes poliméricas interpenetrantes, mediante la técnica de inyección de flujo a presión. Para ello, el monómero N-(4-vinilbencil)-N-metil-D-glucamina se sintetizó a partir de 4-(clorometil)estireno y N-metil-D-glucamina. Posteriormente, este se polimerizó via radicales libres empleando los poros de una membrana asimétrica de ultrafiltración como soporte para la reacción. Detalles de este procedimiento ha sido previamente publicados (Palencia et al. 2014).

Caracterización de las muestras de suelo

Tres suelos con diferentes condiciones de acidez fueron recolectados en el departamento de Córdoba (Colombia). Antes de los

análisis de caracterización, cada suelo fue previamente secado a temperatura ambiente y tamizado empleando un tamiz de 2 mm. La caracterización de los suelos se efectuó en las instalaciones del Laboratorio de Suelos y Aguas de la Universidad de Córdoba (Montería-Colombia). Los parámetros analizados, por triplicado, fueron: textura, pH, contenido de materia orgánica, contenido de fósforo disponible, azufre, bases intercambiables (Na, K, Ca y Mg) y elementos menores (Cu, Fe, Zn y Mn) (IGAC 2006). Los suelos fueron identificados como S-1(pH), S-2(pH) y S-3(pH).

Retención de boro en soluciones acuosas

Los experimentos de retención de boro fueron realizados por el método de lavado a diferentes valores de pH (5,0, 7,0 y 9,0) y empleando una celda de ultrafiltración Amicon (modelo 8050, Millipore). Detalles del método y del dispositivo de ultrafiltración han sido previamente descritos (Rivas et al. 2011). En estos experimentos 25 mL de la solución de ácido bórico a una concentración de 20 mg L⁻¹ y al pH de trabajo fueron adicionados al interior de la celda de UF y posteriormente desde el reservorio se hizo pasar agua a igual pH. La presión utilizada fue de 300 kPa usando nitrógeno gaseoso como fuente de presión y una agitación constante de 200 rpm. El permeado se colectó en fracciones de 10 mL a los cuales se le midió el tiempo de recolección para cada fracción y la concentración de boro. Una vez finalizado cada experimento, la membrana se descargó mediante lavados sucesivos con agua a pH 11. Cada una de las fracciones colectadas tanto del permeado, como del retenido, se almacenó en recipientes plásticos y se cuantificó mediante el método de la azometina-H (Sah y Brown 1997; IGAC 2006).

Retención de boro a partir de extractos de suelo

Extracción por el método del agua caliente

Para la extracción de boro disponible se pesaron 10 g de suelo y se introdujeron en una bolsa ziploc con 19,5 mL de agua, sin agitar se adicionó 0,5 mL de una solución de BaCl₂•2H₂O al 10%. En el caso del suelo 3, se adicionó también 0,05 g de carbón activado. Posteriormente, se introdujeron 14 bolsas con diferentes muestras de suelo a un microondas y empleando una potencia de 490 W se programó un tiempo de 5 min, al cabo del cual se sacaron las muestras y se dejaron en reposo durante 30 min, para finalmente filtrar la solución empleando papel cuantitativo (IGAC 2006). El extracto se almacenó en recipientes plásticos hasta la cuantificación del boro por el método de la azometina-H.

Capacidad de retención de boro disponible

Para la determinación de la capacidad de retención de boro disponible, el extracto acuoso obtenido por el método de agua caliente se empleó como solución de alimentación en el método de lavado, aplicando el procedimiento descrito previamente para los experimentos por el método de lavado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Detalles de la caracterización de las membranas no son mostrados aquí. En términos generales, se obtuvieron tres membranas con concentraciones diferentes de grupos glucamina (Tabla 1).

Caracterización de las muestras de suelo

Los resultados de la caracterización de los suelos se detallan en la tabla 2, en ella se muestra la

procedencia de cada suelo y la identificación de los mismos. Como se puede observar, los valores de pH estuvieron desde un rango ácido a ligeramente básico (4,88 – 7,24), en general los suelos fueron de textura fina con contenidos de materia orgánica (MO) deficientes en todos los casos. Los contenidos de bases intercambiables deficientes para el suelo S-1(4,88) y

relativamente altos para los suelos S-2 (6,39) y S-3 (7,24); esta deficiencia puede ser atribuida al pH de estos suelos y a los bajos contenidos de MO. Adicionalmente, se evidenció la presencia de aluminio intercambiable en la muestra S-1(4,88) lo cual se atribuye a la disolución de aluminio intercambiable como resultado de su acidez (pH < 5,5).

Tabla 1. Unidades de glucamina incorporadas en las membranas a diferentes concentraciones de mezcla reactiva.

Membranas	M1	M2	M3
Unidades de glucamina incorporadas (1x10 ⁻⁵)*	1,37 ± 0,57	1,83 ± 0,13	5,98 ± 0,68
Resina incorporada (%)	3,4 ± 1,4	3,8 ± 0,6	13,9 ± 0,5

* Las unidades están dadas en milimoles

Tabla 2. Análisis de caracterización agrícola de las muestras de suelo

Parámetro (procedencia)	Unidad	S-1(4,88) (Montelibano)	S-2(6,39) (Unicor)	S-3(7,24) (Sincelejo)
Textura	---	Arcilloso	Franco-Arcillo- limoso	Arcilloso
pH		4,88	6,39	7,24
M.O.	%	0,34 (d)	1,19 (d)	1,02 (d)
S	mg/kg	19,3 (d)	4,6 (d)	7,7 (d)
P	mg/kg	2,7 (d)	18,5 (c)	35,6 (a)
B	mg/kg	1,2 (a)	0,6 (a)	1,0 (a)
Ca	cmol+/kg	0,7 (d)	9,6 (a)	33,0 (a)
Mg	cmol+/kg	0,02 (d)	7,3 (a)	14,2 (a)
Na	cmol+/kg	0,04 (d)	0,34 (a)	0,10 (d)
K	cmol+/kg	0,07 (b)	0,12 (b)	0,51 (b)
Al+H	cmol+/kg	5,42	---	---
CICe	cmol+/kg	6,2	17,3	47,8
Cu	mg/kg	0,9 (d)	3,8 (a)	0,8 (d)
Fe	mg/kg	9,8 (d)	33,6 (a)	5,6 (d)
Zn	mg/kg	0,4 (d)	3,5 (a)	0,9 (d)
Mn	mg/kg	1,6 (d)	58,8 (a)	21,0 (c)

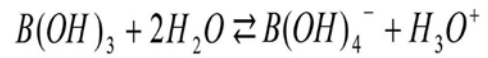
Diagnóstico del suelo: a: contenido abundante o valor alto pero no excesivo, b: contenido suficiente o valor adecuado, c: contenido moderado o valor medio y d: contenido deficiente o valor bajo. CICe: Capacidad de intercambio catiónico efectiva

Por otro lado, aunque los contenidos de bases de intercambio fueron deficientes para el suelo S-1(4,88), éste al igual que el suelo S-3(7,24) presentaron una capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe) alta en comparación con el suelo S-2 (6,39). Un valor alto de CICe puede atribuirse a un mayor contenido de arcilla en estos suelos, lo que se vio reflejado en los resultados de análisis textural. En cuanto a los contenidos de elementos menores (Cu, Fe, Zn y Mn), el único suelo que presentó contenidos abundantes de estos fue el suelo S-2(6,39). Los bajos contenidos de estos elementos en los suelos S-1(4,88) y S-3(7,24) pueden atribuirse muy probablemente a la deficiencia de minerales ricos en estos elementos.

Retención de boro en soluciones acuosas

En la figura 1 se muestra el comportamiento de la retención de boro (RB) para las membranas modificadas a diferentes concentraciones de muestra reactiva. La capacidad de las membranas para retener boro se explica mediante la incorporación de los grupos glucamina (cadenas polihidroxiladas) los cuales pueden formar complejos tetradentados con el boro como átomo central (Polat et al. 2004). Sin embargo, se debe tomar en consideración que cuando el $\text{pH} > \text{pKa}$ se favorece la reacción de competición, es decir, el proceso de disociación de H_3BO_3 en anión tetrahidroxiborato ($\text{B}(\text{OH})_4^-$).

En soluciones acuosas y en condiciones cercanas a la neutralidad, el boro se encuentra en forma de ácido bórico presentando muy poca tendencia a ceder protones ($\text{pKa}_1 = 9,25$). Sin embargo, actúa como ácido de Lewis, por lo que se facilitará la formación del ion hidrobórato ($\text{B}(\text{OH})_4^-$), tal como se muestra a continuación:



La especiación química del ácido bórico en soluciones acuosas se reduce a $\text{B}(\text{OH})_3$ y $\text{B}(\text{OH})_4^-$ debido a que los valores de pKa son muy grandes para la segunda y tercera disociación ($\text{pKa}_2 \sim 12,4$ y $\text{pKa}_3 \sim 13,5$) (Navarro y Navarro 2003).

Además, en soluciones concentradas, se forman diversos aniones poliboratos cuya especiación variará con el pH. En función de la concentración del ácido bórico, en solución acuosa, pueden existir diferentes especies de iones formados por la condensación de varias moléculas de borato y denominadas poliboratos (mono-, di-, tri-, tetra- y penta- boratos). A concentraciones de boro menores a $0,025 \text{ mol L}^{-1}$, las únicas especies presentes en disolución son las monomoleculares, es decir, ácido bórico y su anión borato. Los iones triborato aparecen a concentraciones superiores a $0,025 \text{ mol L}^{-1}$ y el resto de los iones poliboratos existen solamente a concentraciones mayores que $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ (Navarro y Navarro 2003; Shibli y Srebnik 2005; Ahmad et al. 2012; Aubert y Pinta 1977; Reid 2010).

Por lo tanto, la capacidad de retención de boro se espera que disminuya a valores de pH superiores a 9,2 como consecuencia del equilibrio de disociación ($\text{pKa} = 9,2$). Además, la capa activa inicial (celulosa) posee un rango de pH de operación entre 3-12, por fuera de dicho rango la celulosa sufre hidrólisis y la integridad de la membrana se ve comprometida. Debido a lo anterior, los experimentos de descarga se realizaron utilizando soluciones de NaOH a pH 11. Al evaluarse la capacidad de carga y

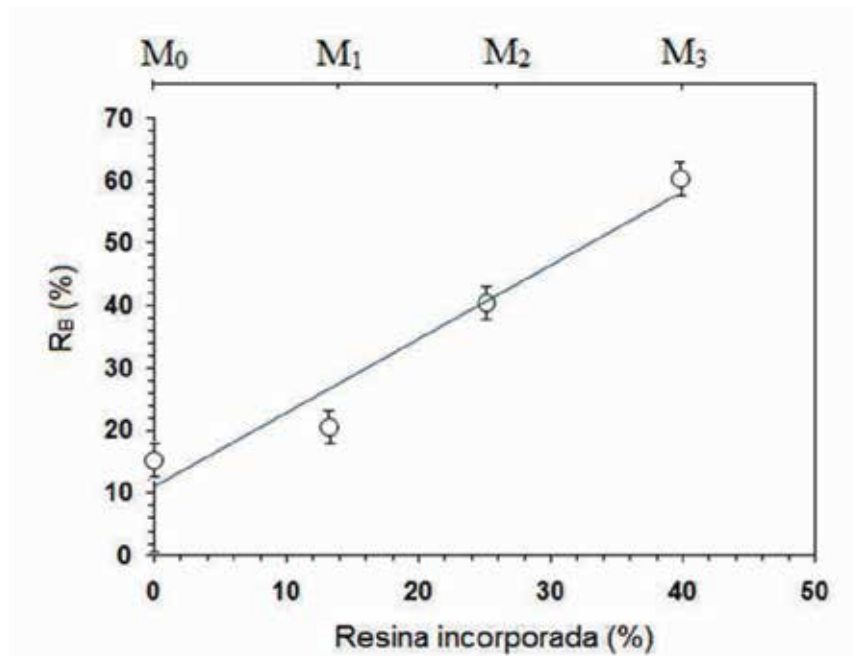


Figura 1. Retención de boro para una concentración de $3,0 \text{ mg de B L}^{-1}$ y tiempo de contacto de 60 min. M₀ corresponde a la membrana sin modificar y M₁, M₂ y M₃ a las membranas modificadas de acuerdo a la información de la Tabla 1.

descarga para las mismas membranas, 5 ciclos carga-descarga para cada una de ellas, no se evidenció una disminución en la capacidad de retención de boro por el sometimiento de las membranas a los ciclos de descarga, es decir, a pH 11,0 el boro retenido por la membrana puede ser recuperado y la membrana no pierde su capacidad de retención, como se muestra en la figura 2.

En la tabla 3 se muestran los valores de capacidad máxima de retención (CMR) en función del pH para cada una de las membranas utilizadas. Se puede observar que la CMR se ve influenciada por el pH de la solución. En general, la retención de boro disminuyó con el incremento del pH desde 5 hasta 9. Esta variación puede explicarse mediante la formación de diferentes especies de aniones boratos en la medida que el pH se hace más básico.

Retención de boro a partir de extractos de suelo

Estos experimentos se realizaron únicamente con la membrana M₂ la cual fue seleccionada de forma estocástica. En la Figura 3, se muestra el comportamiento del flujo en función del tiempo cuando la membrana se puso en contacto con los tres tipos de suelos. Los comportamientos obtenidos muestran que el flujo se mantuvo constante en todos los casos, lo que significa que durante los experimentos no se ocurrieron fenómenos de ensuciamiento apreciables. Los valores de CMR fueron $0,0023$; $0,51$ y $0,10 \text{ mg de B g}^{-1}$ de membrana para los suelos S-1($4,88$), S-2($6,39$) y S-3($7,24$), respectivamente. Nótese que aunque los resultados corresponden a una misma membrana, los valores de CMR variaron dependiendo del extracto de suelo utilizado, esto sugiere que es posible asociar una respuesta en términos de las características del suelo.

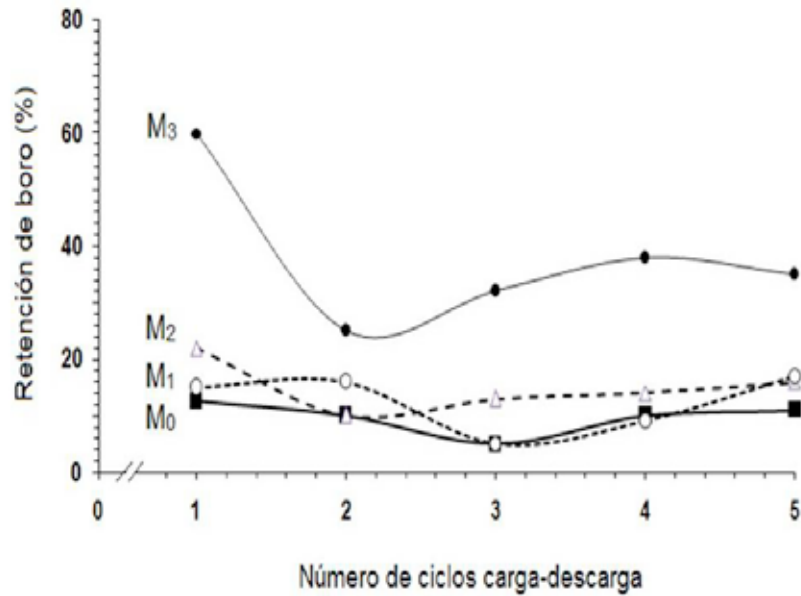


Figura 2. Experimentos de carga-descarga para las membranas modificadas.

Tabla 3. Capacidad máxima de retención a diferentes pHs para cada una de las membranas.

Membrana	CMR (mg de B/g de membrana)		
	pH:5,0	pH:7,0	pH:9,0
M1	0,49	0,33	0,088
M2	0,51	0,18	0,15
M3	0,10	0,019	0,052

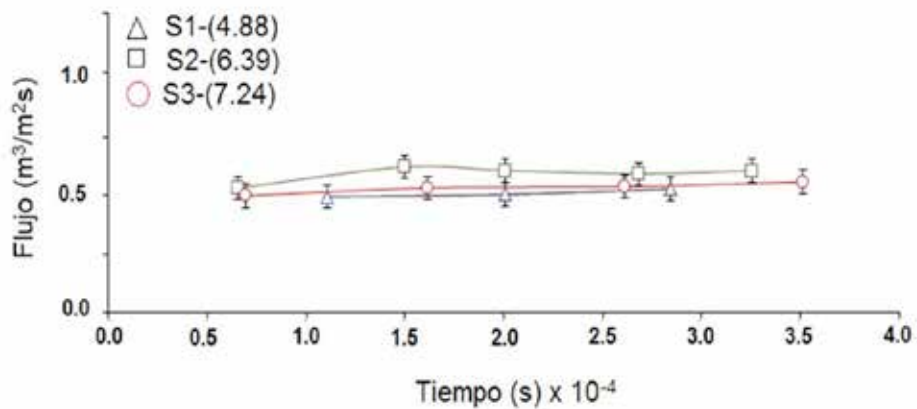


Figura 3. Comportamiento del flujo en función del tiempo para los tres extractos acuosos de suelo.

Se puede observar que el valor de CMR para S-1(4,88) se redujo de forma drástica en comparación con el valor obtenido en una solución acuosa de H_3BO_3 con un pH similar (Tabla 3).

Esto puede atribuirse a interferencias por la presencia de aluminio, el cual sólo se encuentra en cantidades apreciables a pHs menores de 5,5 (Navarro y Navarro 2003), siendo este el caso del suelo en cuestión (Tabla 2). Desde el punto de vista químico, el Al y el B poseen propiedades similares de reactividad que sugieren que la presencia de Al podría competir por sitios activos, cadenas de polioles, en la superficie del material. Sin embargo, estudios posteriores deben realizarse con el fin de aclarar este punto. Para los suelos S-2(6,39) y S-3(7,24) la tendencia fue similar a la observada en soluciones acuosas, es decir, se observó una disminución conforme aumenta el valor de pH. Esto puede explicarse por la especiación de los iones borato en solución acuosa y por cambios en la fuerza iónica de los extractos por la presencia de iones en solución. Por consiguiente, puede inferirse que una adecuada calibración del material requiere la eliminación de estas especies como etapa previa a su uso.

CONCLUSIONES

Membranas funcionales, con cadenas de polioles, pueden ser empleadas para la retención de boro en solución acuosa y proveniente de extractos de suelos. La capacidad de retención de estas membranas es función del contenido de grupos -OH incorporados y se ve afectada fuertemente por el pH, la presencia de Al^{3+} y en menor

grado por la presencia de especies iónicas. Los resultados sugieren que estos materiales pueden ser empleados potencialmente para la correlación de los contenidos de boro de un determinado cultivos, en condiciones ideales de campo, con la respuesta analítica medida a nivel de laboratorio.

REFERENCIAS

- Agarwal, S., Greiner, A. and Wendorff, J. 2013.** Functional materials by electrospinning of polymers. *Progress in Polymer Science*. 38: 963-991.
- Ahmad, W., Zia, M., Malhi, S. and Niaz, A. 2012.** Boron Deficiency in soils and crops: a review. *Crop Plant*. p77-114.
- Aubert, H. and Pinta, M. 1977.** Trace elements in soils. Elsevier Scientific, Amsterdam. 395p.
- Blevins, D. and Lukaszewski, K.1998.** Boron in plant structure and function, *Annual Reviews Plant Physiology Plant Molecular Biology*. 49: 481-500.
- Bonilla, I. and Bolaños, L. 2009.** Mineral Nutrition for Legume-Rhizobia Symbiosis: B,Ca, N, P, S, K, Fe, Mo, Co, and Ni: A Review, *Journal Sustainable Agricultural Environment*. p253-274.
- Chaudhary, Y. and Shukla, L. 2004.** Evaluation of extractants for predicting availability of boron to mustard in arid soils of India. *Communication in Soil Science Plant Analysis*. 35: 267-283.

- Dembitsky, M. 2005.** Contemporary aspects of boron: chemistry and biological applications. Elsevier B. V., Amsterdam. 593p.
- Handreck, K. 1990.** Methods of assessing boron availability in potting media with special reference to toxicity. Communication in Soil Science Plant Analysis. 21: 2265-2280.
- Instituto Geografico Agustin Codazzi (IGAC). 2006.** Métodos analíticos del laboratorio de suelos. VI Edición. Bogotá, Subdirección de Agrología.
- Lvov, Y. and Abdullayev, E. 2013.** Functional polymer-clay nanotube composites with sustained release of chemical agents. Progress in Polymer Science. 38: 1690-1719.
- McGreehan, S., Topper, K. and Naylor, D. 1989.** Sources of variation in hot water extraction and colorimetric determination of soil boron, Communication Soil Science and Plant Analysis. 20: 1777-1786.
- Navarro, S. and Navarro, G. 2003.** Química agrícola: El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. 2a ed. Mundi-prensa, Barcelona. 487 p.
- Palencia, M., Vera, M. and Combatt, M. 2014.** Polymer networks based in (4-vinylbenzyl)-N-methyl-D-glucamine supported on microporous polypropylene layers with retention boron capacity. Journal of Applied Polymer Science, 131. DOI: 10.1002/app.40653
- Polat, H., Vengosh, A., Pankratov, I. and Polat, M. 2004.** A new methodology for removal of boron from water by coal and fly ash, Desalination. 164: 173-188.
- Reid, R. 2010.** Can we really increase yields by making crop plants tolerant to boron toxicity?. Plant Science. 178: 9-11.
- Rivas, B., Pereira, E., Palencia, M. and Sánchez, J. 2011.** Water-soluble functional polymers in conjunction with membranes to remove pollutant ions from aqueous solutions, Progress in Polymer Science. 36: 294-322.
- Roig, A, López, F. and Hernández, F. 1996.** Application of azomethine-H method to the determination of boron in workplace atmospheres from ceramic factories, Journal of Analytical Chemistry. 356: 103-106.
- Sah, R. and Brown, P. 1997.** Boron determination - a review of analytical methods, Microchemical Journal. 56: 285-304.
- Ulbricht, U. 2006.** Advanced functional polymer membranes, Polymer. 47: 2217-262