

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

Sociedad Colombiana
de la Ciencia del Suelo

DOI 10.47864/SE(53)2023p26-38_171

EVALUACIÓN DE DIFERENTES MÉTODOS EXTRACCIÓN DE BORO DISPONIBLE Y SU CORRELACIÓN CON EL B ABSORBIDO POR EL CULTIVO DE FRÍJOL CAUPÍ (VIGNA UNGUICULATA) EN TRES SUELOS DE CÓRDOBA

Enrique Miguel Combatt Caballero¹✉, Jaime Luis Mercado Lázaro², Robert Smith Valencia Agressoth³, María José López Manjarrez⁴, Danny Esther Caraballo Laza⁵¹Universidad de Córdoba. ✉
emcombatt@correo.unicordoba.edu.co.
orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8760-0089>²Universidad de Córdoba.
jlmecadolazaro@correo.unicordoba.edu.co.
orcid: <http://orcid.org/0000-0002-4177-1907>³Universidad Nacional Abierta y a Distancia- ECAMPA-.
robert.valencia@unad.edu.co.
<http://orcid.org/0000-0001-5529-3830>⁴Universidad de Córdoba.
mlopezmanjarrez@gmail.com. OrCID:
<http://orcid.org/0000-0003-0360-5796>⁵Universidad de Córdoba.
danny.caraballo19l@gmail.com. OrCID:
<https://orcid.org/0000-0001-8862-2442>

RESUMEN

Se trabajó con un diseño en bloques con arreglo factorial de 6x3, a cada suelo se le aplicó seis dosis de B a partir de solución concentrada de ácido bórico (0,0; 0,25; 0,6; 1,3; 2,0; 3,0 mg kg⁻¹), con 3 repeticiones por tratamiento para llegar a un total de 54 unidades experimentales. Luego de una incubación de suelo con las dosis de B, se establecieron 8 semillas por UE de frijol variedad L-0.42, con raleo a los 15 días después de germinación dejando solamente 3 plantas por UE. Se determinó el contenido de B acumulado en todo el tejido foliar una vez transcurridos 35 días después de la siembra, mientras que, a los suelos se les determinó el contenido de B disponible con las seis metodologías extractoras (agua caliente en microonda, cloruro de calcio 0,05 mol L⁻¹, ácido clorhídrico 0,05 mol L⁻¹, fosfato monobásico 0,008 mol L⁻¹, Melich-1 y ácido clorhídrico 0,05 mol L⁻¹ + cloruro de bario 0,075 mol L⁻¹). El análisis estadístico de los resultados mostró que el método de mayor extracción de B disponible fue el Mehlich-1 en los tres suelos; mientras que en los suelos ácido y alcalino el método de menor extracción fue con CaCl₂ 0,05 mol L⁻¹ y en el suelo neutro fue con HCl 0,05 mol L⁻¹. Así mismo, los contenidos de B absorbido por el cultivo fueron proporcional a la dosis aplicada de este nutriente. Los métodos que mejor correlacionaron entre el B absorbido por el frijol fueron: agua caliente con $r > 0,92$ en el suelo ácido, Ca(H₂PO₄)₂ H₂O; $r = 0,99$ en el suelo neutro y CaCl₂, agua caliente, Mehlich-1 y HCl con $r > 0,93$ para el suelo alcalino.

PALABRAS CLAVES:

Métodos de extracción, correlación, boro disponible, pH del suelo, frijol.

EVALUATION OF DIFFERENT AVAILABLE BORON EXTRACTION METHODS AND THEIR EVALUATION WITH THE B ABSORBED BY THE COWPEA (VIGNA UNGUICULATA) CROP IN THREE SOILS OF CÓRDOBA.

KEY WORDS:

Extraction methods, correlation, available boron, soil pH, bean.

ABSTRACT

In order to evaluate six methods of extraction of available boron and its correlation with the B absorbed by the bean crop, three representative soils of acid, neutral and alkaline pH of the department of Cordoba were used for physico-chemical characterization. A block design with a 6x3 factorial arrangement was used. Six doses of B were applied to each soil from a concentrated boric acid solution (0.0, 0.25, 0.6, 1.3, 2.0, 3.0 mg kg⁻¹), with three replicates per treatment for a total of 54 experimental units. In addition to boron application, each EU was fertilized with macro and micronutrients so that the result was not altered by nutritional deficiencies. After a soil incubation with the B doses, 8 seeds per EU of bean variety L-0.42 were established, with thinning 15 days after germination, leaving only 3 plants per EU. The accumulated B content in all leaf tissue was determined 35 days after sowing, while the soils were determined for available B content with the six extractive methodologies (hot microwave water, calcium chloride 0.05 mol L⁻¹, hydrochloric acid 0.05 mol L⁻¹, monobasic phosphate 0.008 mol L⁻¹, Melich-1 and hydrochloric acid 0.05 mol L⁻¹ + barium chloride 0.075 mol L⁻¹). The statistical analysis of the results showed that the method with the highest extraction of available B was Mehlich-1 in the three soils; while in the acid and alkaline soils the method with the lowest extraction was CaCl₂ 0.05 mol L⁻¹ and in the neutral soil it was HCl 0.05 mol L⁻¹. Likewise, the contents of B absorbed by the crop were proportional to the applied dose of this nutrient. The methods that best correlated between the B absorbed by the bean were: hot water with $r > 0.92$ in the acid soil, Ca(H₂PO₄)₂ H₂O $r = 0.99$ in the neutral soil and CaCl₂, hot water, Mehlich-1 and HCl with $r > 0.93$ for the alkaline soil.

Rec : 01/10/2023

Acep : 10/12/2023



INTRODUCCIÓN

Los análisis físicoquímicos de suelos se realizan con la finalidad de conocer la calidad nutricional que se esté presentando en una zona determinada, con la intención de tomar las decisiones necesarias para establecimiento, mejora y/o producción agrícola y así obtener resultados más favorables para el productor como también para el consumidor, bajo el marco de una producción agrícola sustentable (Haby y Leonard, 2005). Hoy por hoy, existen diferentes métodos utilizados para determinar los nutrientes en las plantas a partir del contenido que esté presente en los suelos (Azcarate et al., 2017). Para el caso de boro disponible las soluciones extractoras usadas son desde agua caliente, soluciones salinas o ácidas hasta mezclas entre soluciones (Ferreira et al., 2001). La principal razón de esto se debe a que en los micronutrientes el boro es el segundo de mayor importancia seguido del zinc, lo que hace necesario determinar los rangos de concentración de B en el suelo y a su vez correlacionarlo con el absorbido por las plantas asumiendo que el margen entre deficiencia y toxicidad va a ser diferente para cada especie (Antoniadis et al., 2013), por ende el contenido de B estará sujeta a la solución usada en la extracción (Bustos et al., 2020).

Aun así, en la determinación de B disponible ningún método de extracción arroja resultados completamente satisfactorios en cuanto a la disponibilidad de este elemento, y es que si las metodologías químicas no están calibradas y correlacionadas no se podrá medir el contenido real del elemento en interés (Cortés et al., 2019). Como es el caso del método de extracción en agua caliente propuesto por Berger y Truog (1939), el cual se usa desde 1940, hasta la fecha y que ha contado con numerosas modificaciones para determinar B disponible. Aunque Deabreu et al. (1994), mencionan que, algunos problemas asociados a este método son su poca adaptabilidad a los análisis de rutina debido a que son procedimientos laboriosos con un alto consumo de tiempo que requieren precauciones especiales para evitar contaminación. Por otra parte, Niaz et al. (2011), encontró que el método de extracción ácido clorhídrico 0,05M puede sustituir al método de agua caliente para boro disponible para las plantas en suelos alcalinos y calcáreos con condiciones de baja fertilidad. Otros métodos se han evaluado, pero en general no son consistentes para todos los tipos de suelos basados en el análisis foliar, teniendo en cuenta que un método adecuado para el análisis de boro debe abarcar las propiedades del suelo que determinan la disponibilidad de boro y las condiciones en los análisis de rutina del laboratorio (Mandal et al. 2016).

No es una falacia que en los últimos años se han dedicado más esfuerzos a las investigaciones de los tres

macronutrientes fundamentales (N, P y K), dejando de lado otros elementos que juegan un papel importante en la nutrición mineral, así como también los métodos de extracción de estos elementos en laboratorio (Bender et al., 2015). Por esto surge la necesidad de buscar métodos que permitan determinar en forma confiable las concentraciones de los elementos nutricionales del suelo como es el caso del B (Russi et al., 2012), en espera de lograr una producción sustentable para el departamento, además de realizar estudios en lo que respecta a micronutrientes tanto en el departamento como en el país, debido a la poca información que hay acerca del tema (Pagani y Echeverría, 2009).

Siendo el departamento de Córdoba un territorio multiedafológico, de condiciones climáticas deseables para cualquier especie vegetal, diversidad geográfica y microbiana, se planteó como objetivo evaluar diferentes métodos de B disponible y su correlación con el B absorbido por el cultivo de frijol en suelos de pH ácido, neutro y alcalino.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este experimento fue realizado en el Laboratorio de Suelos y Aguas de la Universidad de Córdoba. Para lo cual fueron seleccionados tres suelos representativos de diferentes zonas del departamento de Córdoba, teniendo en cuenta como característica química el pH. Clasificándolos en suelos ácido, neutro y alcalino característicos de los municipios de Montelíbano, Montería, y Moñitos respectivamente. Las muestras se recolectaron a una profundidad de 0 – 20 cm y se caracterizaron físico-químicamente conforme a las metodologías del IGAC (2006), el B fue determinado por HCl 0,05 mol L⁻¹ (Silva y Ferreyra, 1998).

Se implementó un diseño experimental de bloques casualizado, con esquema factorial 6x3 (dosis x suelos) con tres repeticiones, para un total de 54 unidades experimentales (UE). Las dosis fueron: 0,0; 0,5; 1,2; 2,6; 4,0 y 6,0 kg ha⁻¹ de B, equivalente a 0,0; 0,25; 0,6; 1,3; 2,0; 3,0 mg kg⁻¹ de B por maceta. La fuente de boro utilizada fue ácido bórico aplicado en forma de solución al suelo. Se procedió a la siembra de 8 semillas de frijol línea L-0.42 luego de 15 días después de la aplicación del B en cada UE. Transcurridos 5 días después de la germinación, se realizó raleo dejando 3 plantas por UE. Para la fertilización del cultivo los elementos nutricionales se aplicaron al suelo en forma fraccionada con 1250, 900 y 990 mg/maceta de N, P y K a los 5, 15 y 25 días después de la siembra, además se aplicaron 175 y 105 mg/maceta de Ca y Mg a partir de CaCl₂ y MgSO₄·7H₂O. Para los micronutrientes se aplicaron en g kg⁻¹ 3,66 de Mn; 400 de Zn; 1,33 de Cu; de Mo 0,15 y de Fe 1,56 utilizando como fuentes (MnSO₄·3H₂O, ZnSO₄·7H₂O, CuSO₄·5H₂O, Na₂MoO₄·2H₂O y FeSO₄·7H₂O). Las plantas fueron irrigadas con agua destilada una vez por día manteniendo los suelos a capacidad de campo teniendo en cuenta la evapotranspiración. Transcurrido 35 días

de la siembra, en cada unidad experimental se realizó un corte de la parte aérea de la planta a 1,0 cm de la superficie, se clasificaron los diferentes tejidos en Para extraer el contenido de B absorbido por los cultivos las muestras de hojas y tallos fueron molidas y digeridas con una mezcla ácida de (HNO₃: HClO₄: H₂SO₄ 3:1:1 v/v). El B fue determinado por espectrofotometría de absorción molecular (Perkin Elmer Lambda XLSC, Waltham, MA, USA) usando el cuantificado por el método de azometina-H a una longitud de onda de 420 nm (Wolf, 1974). Para la determinación de B disponible en los suelos, se utilizaron seis soluciones extractoras: agua caliente en microonda (Abreu et al., 1994), cloruro de calcio 0,05 mol L⁻¹ (Ferreira et al., 2001), ácido clorhídrico 0,05 mol L⁻¹ (Silva y Ferreyra, 1998), fosfato monobásico de calcio 0,008 mol L⁻¹ (Molina y Frye, 1982), Mehlich -1 (Embrapa, 1997), y ácido clorhídrico 0,05 mol L⁻¹ + cloruro de bario 0,075 mol L⁻¹ (propuesto por los autores). Las variables respuesta a considerar en este experimento correspondieron a los contenidos de B extraído por cada solución extractora en cada unidad experimental de suelo y el contenido de B en los tallo y hojas. Los resultados fueron sometidos a análisis de varianza (ANOVA), regresión y correlación a 5% de significancia, conforme metodologías descritas por Pimentel y García (2002)..

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización fisicoquímica de las muestras de suelo en estudio

En general, el suelo de Montelíbano presentó pH de 4,6; una acidez intercambiable de 5,4 cmol_c kg⁻¹, contenidos de materia orgánica bajo (<1%), capacidad elementos como calcio, magnesio y potasio.

raíces y tallos – hojas y se determinó su masa húmeda, los tejidos fueron secados en estufa a 70 °C por 72 h para la determinación de la masa seca.

de intercambio catiónica efectiva (CICE) baja debido al material coloidal y al tipo de arcilla (caolinita), contenidos de P y S bajos; al igual que los contenidos de cobre, hierro, zinc, manganeso y boro a pesar de tener textura arcillosa. La baja fertilidad se puede asociar a los factores y procesos formadores presentes en este suelo. El suelo de Montería de acuerdo a su pH es neutro y presentó bajo contenido de materia orgánica (1.19%), debido a los altos grados de oxidación como consecuencia del manejo agrícola. En cuanto al contenido de bases es medio más no excesivo, mostró una CICE de contenido medio, con deficiencia marcada de S y P. El contenido de los micronutrientes en términos generales estuvo en un rango óptimo. Estas condiciones químicas de fertilidad se deben a la clase textural franco arcillo-limosa, a la topografía y al material parental que originó este suelo.

El suelo de Moñitos presentó pH ligeramente alcalino, mostró una relación directa con el alto contenido de calcio y magnesio intercambiable; presentó alta CICE producto del contenido de bases, aunque bajos contenidos de materia orgánica. Los elementos menores se encontraron en contenidos deficientes, por la baja solubilidad que estos elementos presentan a este pH. Con relación al B, su contenido fue bajo, debido a que aumenta la adsorción de este elemento por parte de los compuestos de calcio y magnesio, formando principalmente compuesto de borato de calcio los cuales presentan baja solubilidad (Gupta, 1979). Sin embargo, la buena fertilidad desde el punto de vista químico del suelo se debe a la clase textural arcillosa que presenta, la cual permite la adsorción de los

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica de tres suelos colectados en el Departamento de Córdoba.

LOCALIDAD				
Propiedades	MONTELIBANO	MONTERIA	MOÑITOS	Unidades
	Valores			
Arcilla	55,3	28,7	40,3	%
Arena	20,0	18,3	28,3	%
Limo	24,7	53,0	31,3	%
Textura	Arcillosa	Franco Arcillo Limoso	Arcillosa	---
pH	4,6	6,4	7,2	1:1
MO	0,34	1,19	1,02	%
S	19,3	4,6	7,7	mg kg ⁻¹
P	2,7	18,5	35,6	mg kg ⁻¹
Ca	0,70	9,60	33,0	cmol _c kg ⁻¹
Mg	0,02	7,30	14,2	cmol _c kg ⁻¹
K	0,04	0,34	0,10	cmol _c kg ⁻¹
Na	0,02	0,12	0,51	cmol _c kg ⁻¹
Al+H	5,42	-----	-----	cmol _c kg ⁻¹
CICe	6,2	17,4	47,8	
Fe	9,8	33,6	5,6	mg kg ⁻¹
Mn	1,6	58,8	21,0	mg kg ⁻¹
Cu	0,9	3,8	0,8	mg kg ⁻¹
Zn	0,4	3,5	0,9	mg kg ⁻¹

B	0,26	0,40	0,25	mg kg ⁻¹
Ca/B	2,69	24,0	132	-----

pH: Relación suelo-agua 1:1, MO: Walkley – Black, S: Fosfato de calcio monobásico 0,008 mol L⁻¹, P: Bray –II modificado, Ca Mg K Na: Acetato de amonio 1,0 mol L⁻¹ pH 7,0; Al+H: KCl 1,0 mol L⁻¹, CICE: Suma de bases, Cu Fe Zn Mn: Mehlich – 1, B: HCl 0,05 mol L⁻¹, Textura: Bouyoucos.

Análisis estadístico

De acuerdo el análisis de varianza para el boro disponible en los suelo, se encontró diferencias altamente significativas entre los tratamientos, dosis y las interacciones método – dosis. Mostrando que la

concentración extraída está en función del tipo suelo, contenido presente y del método utilizado. Esto se puede corroborar con los análisis del cuadrado medio entre dosis, métodos y sus interacciones para los suelos y los cultivos (Tabla 2).

Tabla 2. Cuadrado medio para el cultivo de frijol en los tres suelos en estudio.

FUENTE DE VARIACION	G. L	SUELO ÁCIDO		SUELO NEUTRO		SUELO ALCALINO	
		BORO					
METODO	5	2,11**	0,00 ns	0,23 **	0,00 ns	0,14 **	0,00 ns
DOSIS	5	0,34 **	2092,8 **	0,30 **	2106,41 **	0,40 **	411,1**
METODO*DOSIS	25	0,07 **	0,00 ns	0,002 *	0,00 ns	0,018 **	0,00 ns
ERROR	72	0,0016		0,001		0,0009	
TOTAL	107						
R²		0,99	0,90	0,97	0,95	0,97	0,92
% CV		9,78	17,02	9,58	9,47	9,66	7,11

ns = No significativo; * = Significativo al 5%; ** = Altamente significativo al 5%

Relación entre el contenido de B disponible en el suelo y el extraído por cada método.

La cuantificación de B disponible en los tres tipos de suelos en el cultivo de frijol, muestra una relación proporcional entre la cantidad de B aplicado al suelo y el extraído por los diferentes métodos, sin embargo los métodos de extracción tiene un comportamiento heterogéneo para cada dosis aplicada, debido a las características químicas que tiene cada solución extractora (ácida, neutra y salinas; lo cual pueden influir en la capacidad de extracción ya que, cada catión índice es diferente, por ende varía el proceso de extracción del elemento en los sitios de intercambio) y a las propiedades físico-química de estos suelos (Tabla 3). El método Mehlich-1 presentó el mayor contenido de boro cuantificado en los suelo ácido, neutro y alcalino correspondiente a 1,42; 0,76 y 0,77 mg kg⁻¹ respectivamente; en la mayor dosis de B aplicada.

Estos resultados están asociados con la concentración de H⁺ en la solución extractora la cual solubiliza el B en los minerales primarios y otras formas de este

elemento que están adsorbido por los óxidos e hidróxidos de Fe, Mn y Al, compuestos que permiten que el B no sea absorbido por la planta. Bingham (1982), encontró que las soluciones ácidas como Mehlich-1 y Mehlich-3 son capaces de extraer micronutrientes disolviendo de la fase sólida. Los resultados concuerdan con Gupta (2006), quien indica que la disponibilidad de B depende del material de origen y de la mineralogía, porque las reacciones de hierro y aluminio controlan su solubilidad. Rosolem et al. (2008), confirman que los contenidos de B en los suelos ácidos están afectados por los factores como pH, textura, materia orgánica y mineralogía y que a medida que estos factores varíen entre suelos mayor divergencia se notara en el contenido de B.

Tabla 3. Contenido de B extraído por cada método a diferentes dosis de B aplicado en suelos del departamento de Córdoba.

DOSIS	SUELO ÁCIDO						SUELO NEUTRO						SUELO ALCALINO					
	(B mg kg ⁻¹)																	
kg ha ⁻¹	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆
0,0	0,33	0,20	0,08	0,10	0,34	0,25	0,11	0,26	0,17	0,22	0,40	0,22	0,19	0,13	0,13	0,15	0,18	0,21
0,5	0,33	0,21	0,08	0,11	0,84	0,28	0,11	0,28	0,20	0,23	0,41	0,25	0,19	0,17	0,14	0,15	0,23	0,21
1,2	0,37	0,32	0,09	0,11	1,17	0,30	0,16	0,34	0,22	0,30	0,46	0,28	0,21	0,30	0,16	0,16	0,27	0,30
2,6	0,43	0,40	0,12	0,12	1,23	0,32	0,27	0,50	0,25	0,37	0,58	0,38	0,34	0,52	0,18	0,27	0,45	0,39
4,0	0,49	0,54	0,16	0,18	1,39	0,37	0,34	0,53	0,29	0,44	0,66	0,45	0,45	0,53	0,21	0,36	0,62	0,50

6,0	0,60	0,71	0,24	0,25	1,42	0,45	0,43	0,63	0,41	0,56	0,76	0,57	0,61	0,67	0,25	0,46	0,77	0,59
-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

M₁: HCl 0,05 mol L⁻¹, **M₂:** Agua caliente, **M₃:** CaCl₂ 0,005 mol L⁻¹ **M₄:** Ca(H₂PO₄)₂ H₂O 0,008 mol L⁻¹, **M₅:** Mehlich – 1, **M₆:** HCl 0,05 + BaCl₂ 0,075 mol L⁻¹.

Por el contrario el método que presentó menor extracción fue el CaCl_2 0,005 mol L⁻¹ con 0,08 y 0,14 mg kg⁻¹ en los suelos ácido y alcalino respectivamente a la mínima dosis aplicada. Esto es ocasionado por los altos contenidos de calcio presentes en el suelo y en la solución extractora, los cuales forman complejos de borato de calcio que son de baja solubilidad, por lo que el poder extractor del ion cloruro de la solución no tiene un efecto marcado para desplazar al B de las zonas de cambio. Por otro lado, en el suelo neutro la solución HCl 0,05 mol L⁻¹ extrajo la menor cantidad con 0,11 mg kg⁻¹ en promedio a la dosis más baja aplicada de 0,5 kg ha⁻¹.

Regresión lineal entre el contenido de B disponible en el suelo y el absorbido por la planta.

Los coeficientes de regresión lineal entre el contenido de B en la parte aérea de la planta y las dosis de B aplicadas para el cultivo de frijol en los tres suelos

fueron altamente significativos (Tabla 4). En las ecuaciones de regresión lineal se observó que, un aumento de la dosis de B aplicado al suelo ocasiona un incremento en el B absorbido por la planta. Al comparar las pendientes de las rectas de regresión, entre el contenido de B disponible en el cultivo de frijol y B aplicado al suelo, se aprecia que el cultivo de frijol en los tres suelos muestra pendientes altas, lo que significa que un pequeño aumento de B disponible en suelo contribuye con incremento del B en la planta. Según Bono et al. (1999), encontraron respuestas variables a la fertilización con B en la región subhúmeda pampeana, además indican que ensayos donde se trabaje con fertilización y especialmente en los que se estudian los micronutrientes, no se puede llegar a conclusiones certeras sin considerar las demás variables edafoclimáticas que condicionan las respuestas.

Tabla 4. Ecuaciones de regresión simple y coeficientes de correlación entre el contenido de B en la parte aérea del frijol y las diferentes dosis aplicadas al suelo.

Suelo	Ecuaciones	R
Ácido	$Y = 4,4756x + 12,924$	0,91
Neutro	$Y = 4,6424x + 17,385$	0,96
Alcalino	$Y = 2,0148x + 16,259$	0,93

Donde Y representa el contenido de B en la parte aérea y X el contenido de B en el suelo.

Relacionando los contenidos de B en la parte aérea con las diferentes dosis aplicadas en los suelos, se observó que a medida que se aumentó la dosis hubo una notable asimilación de B por la planta, presentando la mayor tasa de absorción de B de 37,9 y 44,2 mg kg⁻¹ para los suelos ácido y neutro respectivamente a la dosis de 6,0 kg ha⁻¹; mientras que para el suelo alcalino la cantidad de B acumulada en la planta fue menor a la mayor dosis de B aplicada, en comparación con el suelo ácido y al suelo neutro (Figura 1). Cabe resaltar, que en el suelo neutro es donde se presenta la mayor tasa de acumulación de B por el cultivo, lo que puede ser explicado por las características físico-química como son la textura, el contenido de materia orgánica y la mineralogía que tiene este suelo. Similarmente De Souza et al. (2007), encontraron niveles críticos y tóxicos menores para el

suelo más arcilloso, en cuanto los valores más altos fueron obtenidos para el suelo arenoso.

Además, para este cultivo en el suelo ácido, se observó síntomas de toxicidad a medida que se aumentó la concentración de B en el suelo. Estas sintomatologías se mostraron con manchas marrones necróticas en los márgenes de las hojas más viejas las cuales se extendieron a las más nuevas. Fageria (2000), en un estudio encontró que el contenido de B adecuado en el suelo para los cultivos de frijol, maíz, soya y trigo fueron de 0,9; 1,3; 2,6 y 0,4 mg kg⁻¹ de B respectivamente y los niveles tóxicos para estos cultivos fueron 2,8; 5,7; 5,2 y 4,3 mg kg⁻¹ de B respectivamente. Mariano et al. (2000), determinaron niveles tóxicos de B variando de 1,87 a 4,65 mg dm⁻³.

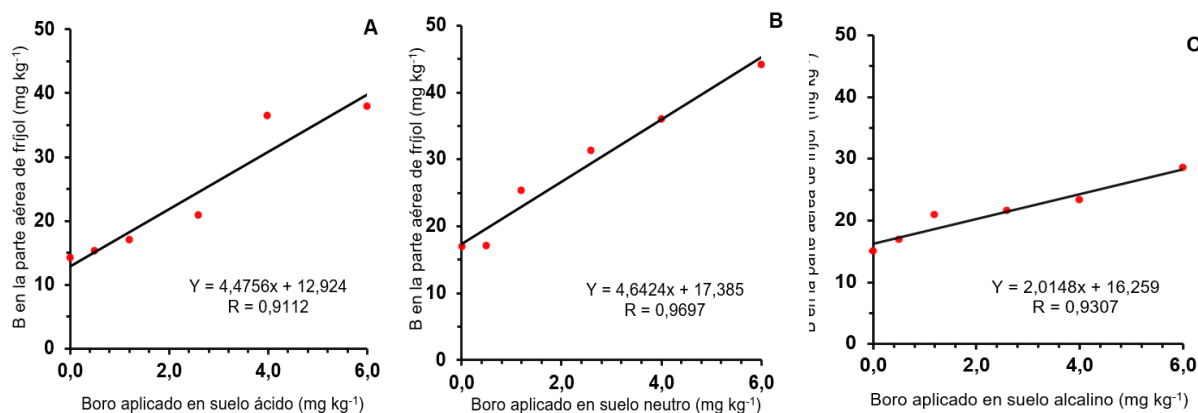


Figura 1. Relación entre el boro aplicado en un suelo ácido (A), neutro (B), alcalino (C) y el boro acumulado en la parte aérea de Fríjol.

Por otro lado, la baja asimilación de B por la planta en el suelo alcalino, se debe al alto contenido de calcio en el suelo que puede formar compuestos insolubles con el boro, esto hace que el B no esté disponible para las plantas, razón por la que hay que tener en cuenta la relación Ca/B en los suelos cuando se aplica este micronutriente. Loué (1988), dice que las relaciones Ca/B superiores a 1,37 en las hojas de cebada en el estado del ahijado y a 3,30 en las hojas de colinabo parecen caracterizar la deficiencia de B. Gupta (1979), expone que en suelos con altos contenidos de calcio se presenta deficiencia de B, debido a que aumenta la adsorción de B por parte del calcio. Tanaka (1967), mostro también que la absorción de B por el nabo se veía reducida por una elevación del contenido de calcio en el medio. Sotiropoulos et al. (1999), encontraron que la que la aplicación de calcio en la solución nutritiva reduce los niveles de B y atenúa notablemente los síntomas visibles de toxicidad en hojas en kiwi (*Actinidia deliciosa*).

Análisis de correlación entre la concentración de boro en la parte área de la planta y las cantidades de boro extraída del suelo por cada método.

En el suelo ácido (Figura 2), se obtuvo altas correlaciones entre las concentraciones de boro en la

parte aérea de la planta y la extraída por las seis soluciones utilizadas. Los coeficientes de correlación variaron entre 0,76 para Mehlich-1 y 0,95 para los métodos de HCl 0,05 mol L⁻¹ y agua caliente. En términos generales el método que mejor correlacionó para cultivo de fríjol fue el método de agua caliente, ya que presenta una menor pendiente. Esto concuerda con Dibyendu et al. (2007), quienes estudiando diferentes extractores de boro: agua caliente, CaCl₂, ácido tartárico, KH₂PO₄ y manitol- CaCl₂ en 20 suelos del estado West Bengal (India), encontraron que el método de agua caliente correlacionó significativamente con los cultivos Mostaza y Trigo. Chaudhary y Shukla (2004), también encontraron mayor extracción con agua caliente entre siete extractores utilizados para determinación de B. Matsi et al. (2000), expone que el método de agua caliente se presenta como la solución más eficiente en extraer boro disponible. A su vez los resultados obtenidos en este trabajo no concuerdan con los encontrados por Li y Gupta (1991), en suelos de Canadá quienes concluyeron que el método HCl 0,05 mol L⁻¹ fue superior que el de agua caliente, siendo recomendado para estimar el B disponible para las plantas en suelos ácidos de esa región.

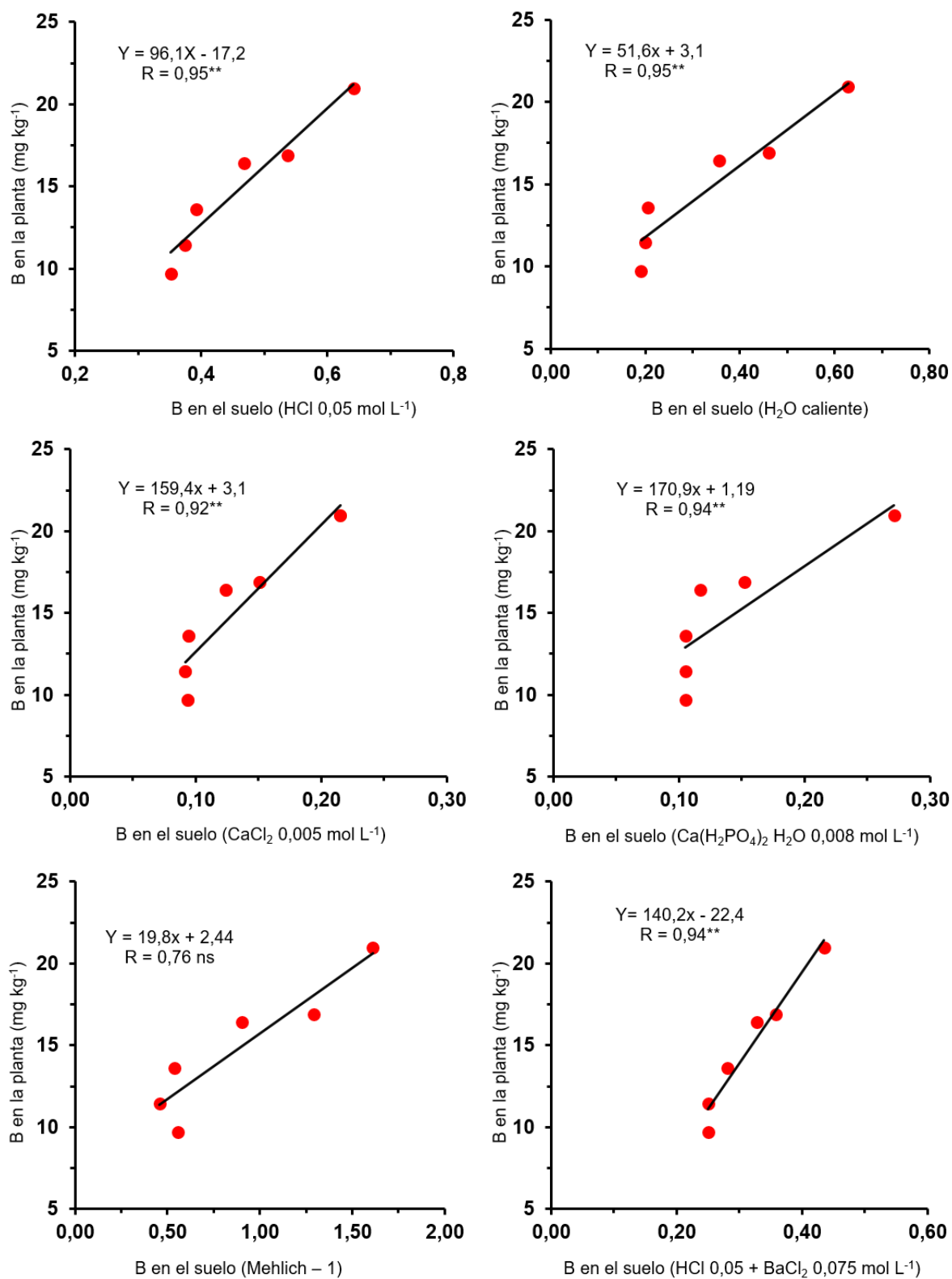
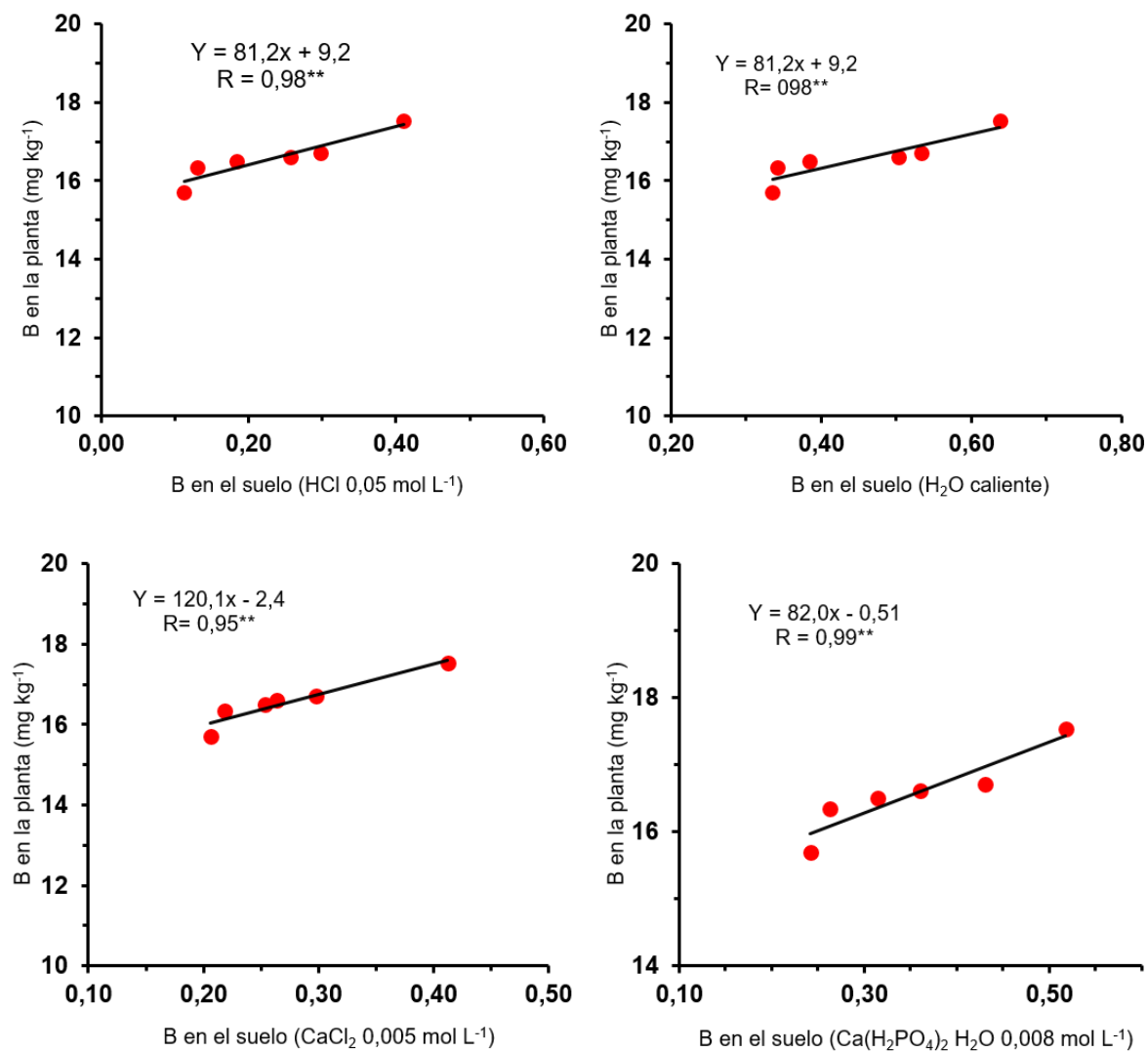


Figura 2. Correlaciones entre la concentración de boro en la parte aérea de la planta de fríjol y las cantidades de boro en el **suelo ácido** extraídas mediante los diferentes métodos.

En el suelo neutro (Figura 3), se encontraron correlaciones elevadas entre la concentración de B presente en la planta y la extraída por los seis métodos empleados, variando los coeficientes de correlación entre 0,95 para CaCl_2 0,005 mol L^{-1} a 0,99 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ H_2O 0,008 mol L^{-1} .



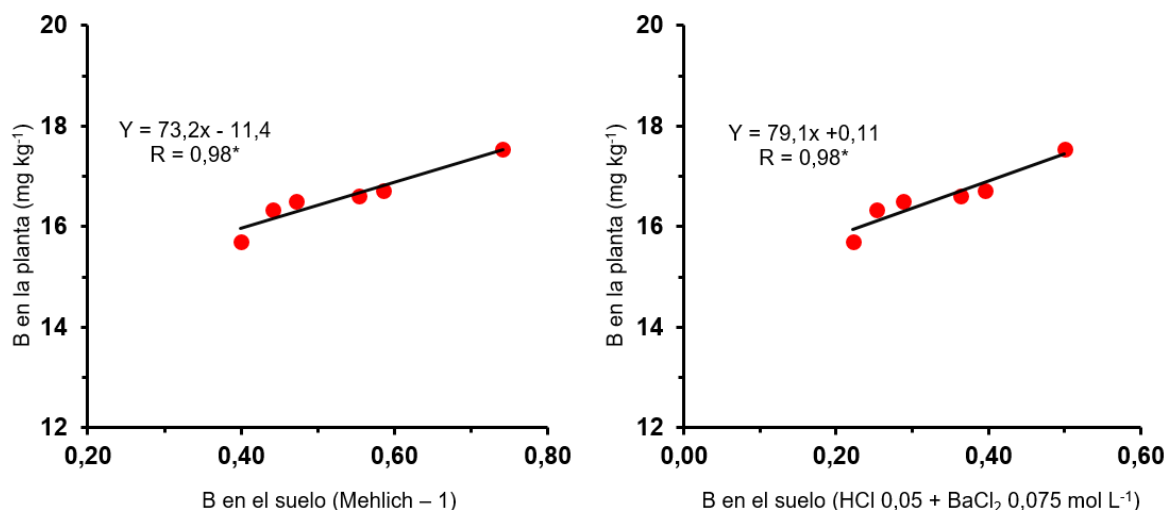


Figura 3. Correlaciones entre la concentración de boro en la parte aérea de la planta de frijol y las cantidades de boro en el **suelo neutro** extraídas mediante los diferentes métodos.

El método de fosfato de calcio fue el que mejor correlacionó con respecto al contenido de B en la planta, considerándose de mayor eficiencia en la determinación de la disponibilidad de boro para este cultivo en este suelo. La eficacia de extracción de este método se puede deber a la capacidad que tiene el ion desplazante PO_4^- de intercambiarse en sitios específicos, especialmente en la arcilla donde el B se encuentra en mayor cantidad adsorbido y su vez es removido por la fuerza que tienen este ion frente a los demás cationes índices de las otras soluciones empleadas. Acorde con Hopkins et al. (2010), quienes observaron una mayor eficacia del $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $0,008 \text{ mol L}^{-1}$ para evaluar B disponible en tres cultivos frijol, tomate y sorgo.

En el suelo alcalino hubo buena correlación entre las variables (Figura 4), boro en la planta y el B extraído por los diferentes métodos de extracción utilizados con coeficiente de correlación entre 0,92 para $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $0,008 \text{ mol L}^{-1}$ y 0,98 para CaCl_2

$0,05 \text{ mol L}^{-1}$. La cantidad de B extraída por el método CaCl_2 $0,005 \text{ mol L}^{-1}$ fue la que mejor correlacionó con la concentración de B determinado en la planta. Esto coincide con Ferreira et al. (2001), quienes encontraron que CaCl_2 5 mmol L^{-1} presentó mayor capacidad de recuperación de B aplicado que el de agua caliente. Rosolem et al. (2008), encontró que el CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ en agua caliente presentó los mayores coeficientes de correlación entre el boro en el suelo y el absorbido por el cultivo de soya. Resultados semejantes ha sido observados por Bataglia y Raij (1990); Abreu et al. (1994); Ferreira, et al. (2001), en donde el método de CaCl_2 con agua caliente mostró mucha eficiencia en la determinación de B en el suelo. Sin embargo, la buena correlación para HCl $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ se debe a la presencia de ácidos fuertes diluidos como ácido clorhídrico (HCl) y ácido sulfúrico (H_2SO_4) que tienen la capacidad de extraer boro en forma soluble ya sea orgánica e inorgánica (Behera et al., 2016).

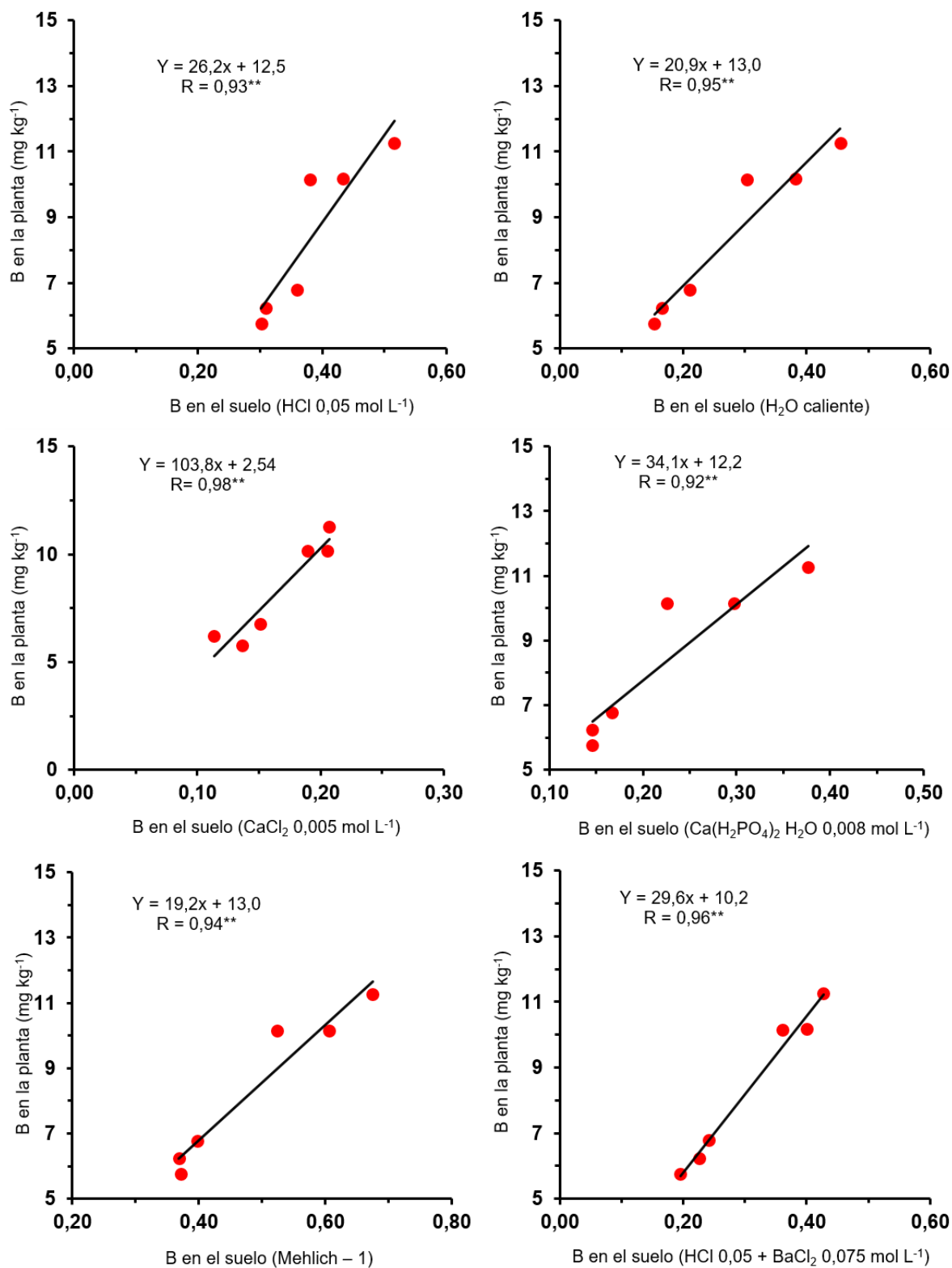


Figura 4. Correlaciones entre la concentración de boro en la parte aérea de la planta de frijol y las cantidades de boro en el **suelo alcalino** extraídas mediante los diferentes métodos.

CONCLUSIONES

El método de mayor extracción de B disponible fue el Mehlich-1 en los tres suelos cuando se aplicaron las diferentes dosis de B.

En los suelo ácido y alcalino el método que menor cantidad de B disponible logró extraer fue el CaCl_2 0,05 mol L⁻¹ y en el suelo neutro fue el HCl 0,05 mol L⁻¹ cuando se aplicó cada una de las diferentes dosis de B.

Los métodos que mejores correlacionaron entre el B absorbido por cultivo de frijol y el extraído del suelo fueron: agua caliente, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0,008 mol L⁻¹ y CaCl_2 0,05 mol L⁻¹ en los suelos ácido neutro y alcalino respectivamente.

BIBLIOGRAFÍA

- Abreu, C.A., Abreu, M.F., Raij, B., Bataglia, O., & Andrade, J. (1994). Extraction of b from soil by microwave Heating for icp-aes determination. *Comm. Soil sci. Plant anal.*, 25, 3321-3333.
- Antoniadis, V., Chatzissavvidis, C., & Paparnakis, A. (2013). Boron behavior in apple plants in acidic and limed soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 176, 267–272.
- Azcarate, M. P., Baglioni, M., Brambilla, C., Brambilla, E., Fernández, R., Kloster, N., & Quiroga, A. (2017). Métodos de análisis e implementación de calidad en el laboratorio de suelos. 69-75
- Bataglia, O., & Raij, B. (1990). Van. Eficiência de extratores na determinação de boro em solos. *R. Bras. Ci. Solo*, 14, 25-31.
- Behera, S., Shukla, A., Singh, M., & Swaroop, B. (2016). Extractable Boron in Some Acid Soils of India: Status, Spatial Variability and Relationship with Soil Properties. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 64(2), 183-192.
- Bender, R., Haeghele, J., & Below, F. (2015). Absorción, partición y removilización de nutrientes en variedades modernas de soja. *Revista de Agronomía*, (107), 563-573.
- Berger, K. C. & Truog, E. (1939). Boron determination in soils and plants using the quinalizarin reaction. *Industrial and engineering chemistry. Analytical edition*, 11, 540-545.
- Bingham, F. T. (1982). Boron. In *Methods of soil Analysis*, eds. A.L. 431-447. Madison, Wisconsin, U.S.A.: USA.
- Bono A., Montoya, J., & Babinec., F. (1999). Fertilización de girasol en la región subhúmeda pampeana. Informe técnico. EEA Anguil, INTA-ASP.
- Bustos, A. N., Álvarez, C., Barbieri, P., Eyherabide, M., & Sainz Rozas, H. R. (2020). Diagnóstico de la disponibilidad de boro soja mediante el análisis de suelo y tejido foliar. *Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo*, 574-579
- Chaudhary, D. R. & Shukla, L. M. (2004). Evaluation of extractants for predicting availability of boron to mustard in arid soils of India. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 35, 267-283.
- Cortés Martínez, R., Lobelles Sardiñas, G., & López Bastida, E. (2019). Proposed technological improvement in the recovery of sulfur from the Cienfuegos oil refinery. *Tecnología Química*, 39(1), 160-182.
- De Souza, J. C., Araújo, C. W., Da Costa J. G., & De Lira M. (2007). Níveis críticos e tóxicos de boro em solos de Pernambuco determinados em casa de vegetação. *R. Bras. Ci. Solo*, 31, 73-79.
- Deabreu, C., Deabreu, M., Vanraij, B., & Bataglia, O. (1994). Extraction of boron from soil by microwave heating for ICP-AES determination. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 25(19-20), 3321- 3333.
- Dibyendu, S., Biswapat, I., & Debasis, M. (2007). Plant availability of boron in acid soil as assessed by different extractans. *Journal of plant nutrition, soil science*, 171, 252-254.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. (1997). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, EMBRAPA-CNPq, 212.
- Fageria, N. K. (2000). Níveis adequados e tóxicos de boro na produção de arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo de

- cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 4(1), 57-62.
- Ferreira, G. B., Fontes, R., Fontes, M., & Alvarez, V. (2001). Influencia de algunas características do solo nos teores de boro disponível [Influence of some soil characteristics in levels of available boron]. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 25, 93–103.
 - Gupta, U. C. (1979a). Boron nutrition of crops. *Adv. Agron.* 31, 273-307.
 - Gupta, U. C. (2006). Chapter 8. Boron. In: *Hand book of plant nutrition*, Barker, A.V. & D.J. Pilbeam (Eds.), 241-277, CRC Presss, Boca Raton, FL, USA.
 - Haby, V. & Leonard. A. (2005). Sustainable alfalfa production on coastal plain soils of the United States. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 36(1-3), 47- 63.
 - Hopkins, B., Joley, V., Webb, B., & Callahan, R. (2010). Boron fertilization and evaluation of four soil extractants: Russet Burbank potato. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 41, 527-539.
 - Instituto Geografico Agustin Codazzi. IGAC. (2006). Métodos analíticos del laboratorio de suelos. VI Edición. Bogotá, Subdirección de Agrología, 499p.
 - Li, R., & Gupta, U. (1991). Extraction of soil B for predicting its availability to plants. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 22, 1003-1012.
 - Loué, A. (1988). Los microelementos en agricultura. 155 – 181.
 - Mandal, J., Padbhushan, R., Kumar, B., Das, A., Bhowmick, A. & Kumar, A. (2016). Evaluation of Different Extractants and Profile Distribution of Boron in Guava Orchard in an Inceptisol of Bihar. *International Journal of Bio-resource and Stress Management*, 7(3), 398-405
 - Mariano, E., Faquin, V., Neto, A., Andrade, A., & Mariano, I. (2000). Níveis críticos de boro em solos de várzea para o cultivo do feijoeiro. *Pesq. Agropec. Bras.*, 35,1637-1644.
 - Matsi, T., Antoniadis, V., & Barbayiannis, N. (2000). Evaluation of the NH_4HCO_3 -DTPA soil test for assessing boron availability to wheat. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 31(5-6), 669-678.
 - Molina, G., & Frye, C. (1982). Selección y calibración de métodos químicos para la evaluación de elementos menores catiónicos en suelos algodoneros de Colombia.
 - Niaz, A., Ahmad, W., Zia, M., & Ranjha, A. (2011). Relative efficiency of different extractants for available boron estimation in alkaline calcareous soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 42, 1934–1944.
 - Pagani, A., Echeverría, H., & Sainz R. (2009). Corn response to nitrogen and sulfur under different environments in the Province of Buenos Aires. *Ciencia del suelo*, 27(1), 21-29.
 - Pimentel Gomes, F. P. & Garcia C. H. (2002). Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais. Piracicaba, FEALQ. 309p.
 - Rosolem, C. A., Zancanaro, L. & Bísar, T. (2008). Boro disponível e resposta da soja em latossolo vermelho-amarelo do mato grosso. *R. Bras. Ci. Solo*, 32, 2375-2383.
 - Russi, D., Gutierrez, B., Prystupa, P., & Rubio. G. (2012). Interlaboratory and intralaboratory testing of soil sulfate analysis in Mollisols of the Pampas. *Commun. Soil Sci. & Plant Anal.* (43), 2535-2543.
 - Silva, F. R. & Ferreyra H. F. (1998). Avaliação de extratores de boro em solos do Estado do Ceará. *R. Bras. Ci. Solo*. 22, 471-478.
 - Sotiropoulos T. E., Therios, I. N., & Dimassi K. N. (1999). Calcium application as a means to improve tolerance of kiwifruit (*Actinidia deliciosa* L.) to boron toxicity. *Scientia Horticulturae*. 81, 443-449.
 - Tanaka, A. (1967). Boron absorption by crops plants as affected by other nutrients of the médium. *Soil sci. Plant Nutr.* 13, 41-44.
 - Wolf B. (1974). Improvements in the azomethine-H method for the Determination of boron. *Soil.Sci. Plant Anal*, 5, 39-44.