

Disponibilidad de boro a partir de diferentes fuentes minerales y su interacción con otros nutrientes

Marcel Barbier PhD
Especialista de Desarrollo
Rio Tinto Borates

Obtención y beneficiado de los boratos



Extracción



Separación

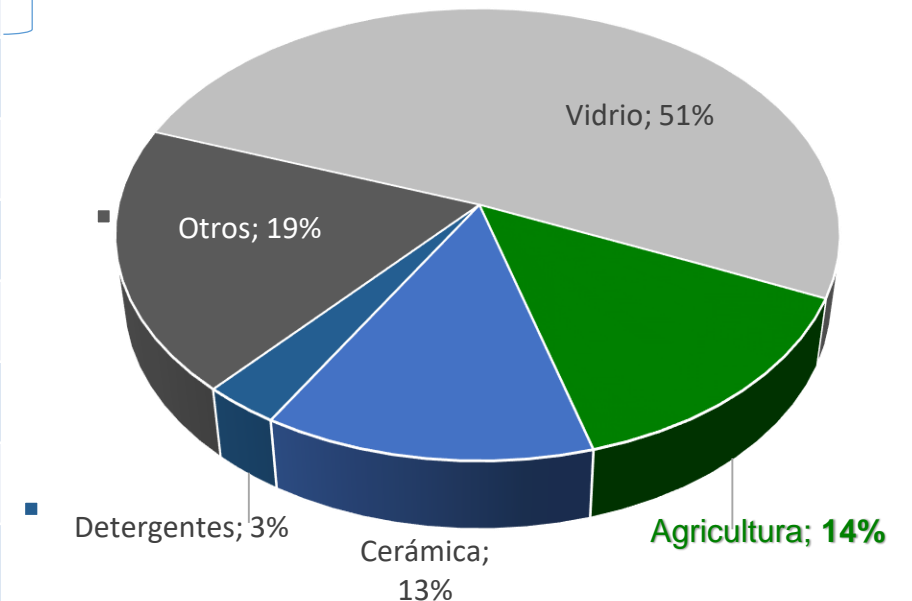


Refinamiento

Se tiene conocimiento de más de 250 diferentes fuentes de boratos, más solamente 11 fuentes són económicamente importantes.

Mineral	Fórmula	% de B ₂ O ₃
Kernita*	Na ₂ B ₄ O ₇ ·4H ₂ O	48.0
Borax (Tincal)*	Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O	35.0
Ulexita*	NaCaB ₅ O ₉ ·8H ₂ O	32.0
Colemanita*	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ ·5H ₂ O	38.0
Hidroboracita*	CaMg _B 6O ₁₁ ·6H ₂ O	48.0
Sassolita	H ₃ BO ₃	56.3
Datolita	CaBSiO ₄ (OH)	24.9
Probertita	NaCaB ₃ O ₉ ·5H ₂ O	49.6
Szaibelyta	MgBO ₂ (OH)	41.4
Tincalconita	Na ₅ [B ₄ O ₅ (OH) ₄] ₃ ·8H ₂ O	47.8
Priceita	CaBO ₁₉ ·7H ₂ O	49.8

Representan más de 90% del mercado mundial.



Absorción del boro por las plantas

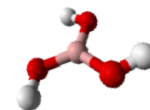
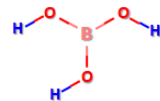
La disociación de los boratos en el suelo es determinada por:

- pH da solución
- Materia orgánica
- Tipos de arcilla
- Humedad del suelo
- Temperatura del suelo

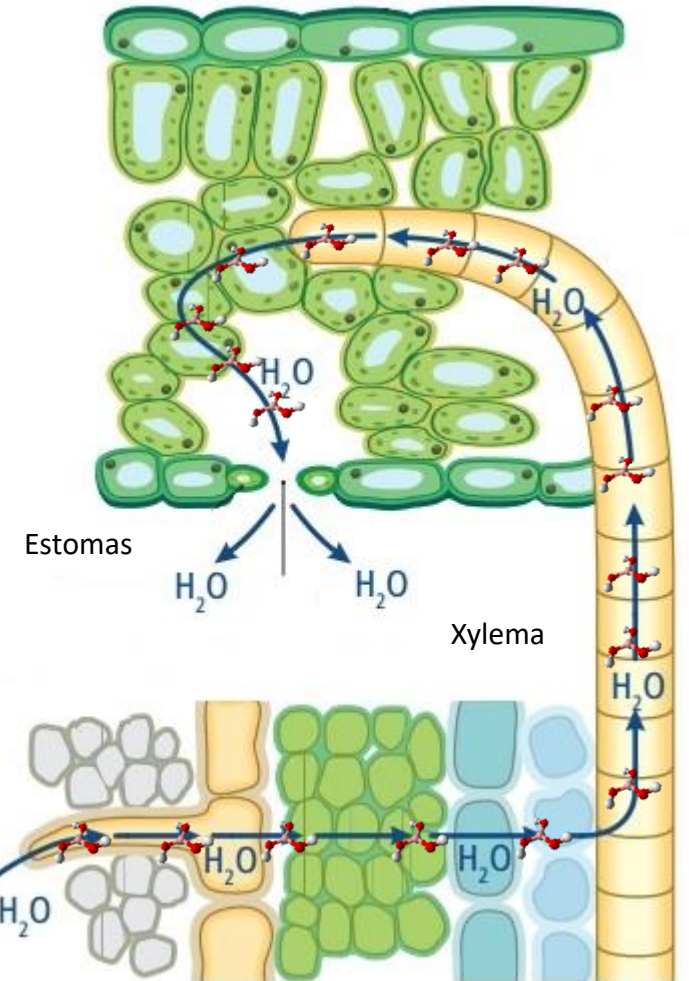
Estas variables determinan la cantidad de B que será disociado en ácido bórico y que estará disponible en la solución del suelo para la absorción de las plantas.²



Las plantas absorben el boro de la solución del suelo en la forma de ácido bórico disociado¹



Raíz



Fuentes:

1. Brown, P. and Hu, H. 1997. Absorption of boron by plant roots. Plant and Soil 193: 49-58.
2. Goldberg, S., 1997 Reactions of boron with soils. Plant and Soil 193: 35-48.

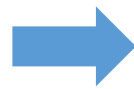
Formas en que el boro se encuentra en el suelo



Imagen: Antonio Jordán, Universidad de Sevilla, España, <https://gsoil.wordpress.com/>

¿En que forma y cuanto B esta disponible para absorción de las plantas?

Boro mineral
(borosilicatos)
20 – 50 ppm B



Boro adsorbido
(Materia orgánica, Arcilla,
óxidos e hidróxidos de Al & Fe)
7 – 22 ppm B



Boro en la solución del suelo
(H_2BO_3)
0.1 – 2.0 ppm B

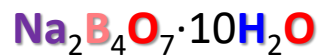
Cuando está abajo de 1 ppm B
Se debe fertilizar

Minerales que contienen boro y son usados para fabricar fertilizantes

Borato de Sodio



Tincal ou Borax



Soluble en agua
(2.65 g/100 ml)

35% $\text{B}_2\text{O}_3 \rightarrow 11\% \text{B}$

Kernita



Soluble en agua
(1.90 g/100 ml)

48% $\text{B}_2\text{O}_3 \rightarrow 15\% \text{B}$

Borato de Sodio y Calcio



Ulexita



Parcialmente soluble en agua
(1.09 g/100 ml)

32* a 48% $\text{B}_2\text{O}_3 \rightarrow 10-15 \% \text{B}$

Borato de Calcio



Colemanita



Insoluble en agua
(0.47 g/100 ml)

38-42% $\text{B}_2\text{O}_3 \rightarrow 12 - 13\% \text{B}$

Borato de Calcio y Magnesio



Hidroboracita



Insoluble en agua
(0.08 g/100 ml)

48% $\text{B}_2\text{O}_3 \rightarrow 15\% \text{B}$

Definiendo un borato refinado

Un borato (B_2O_3) es boro + oxígeno.

Boratos refinados son productos que pasaron por un proceso de beneficiado del mineral, en el cual las impurezas son removidas (metales pesados y otros elementos) que pudiesen estar contenidos en el material original.



Roca extraída

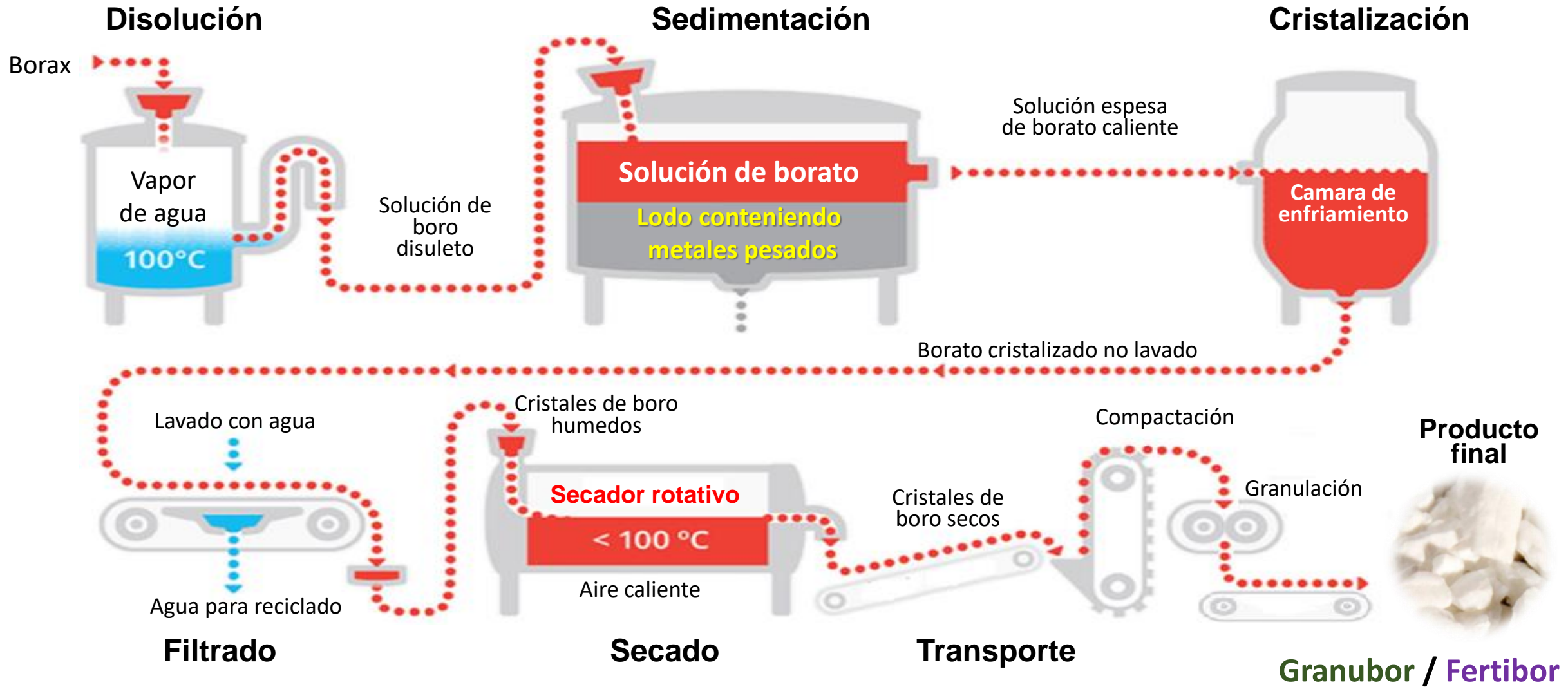


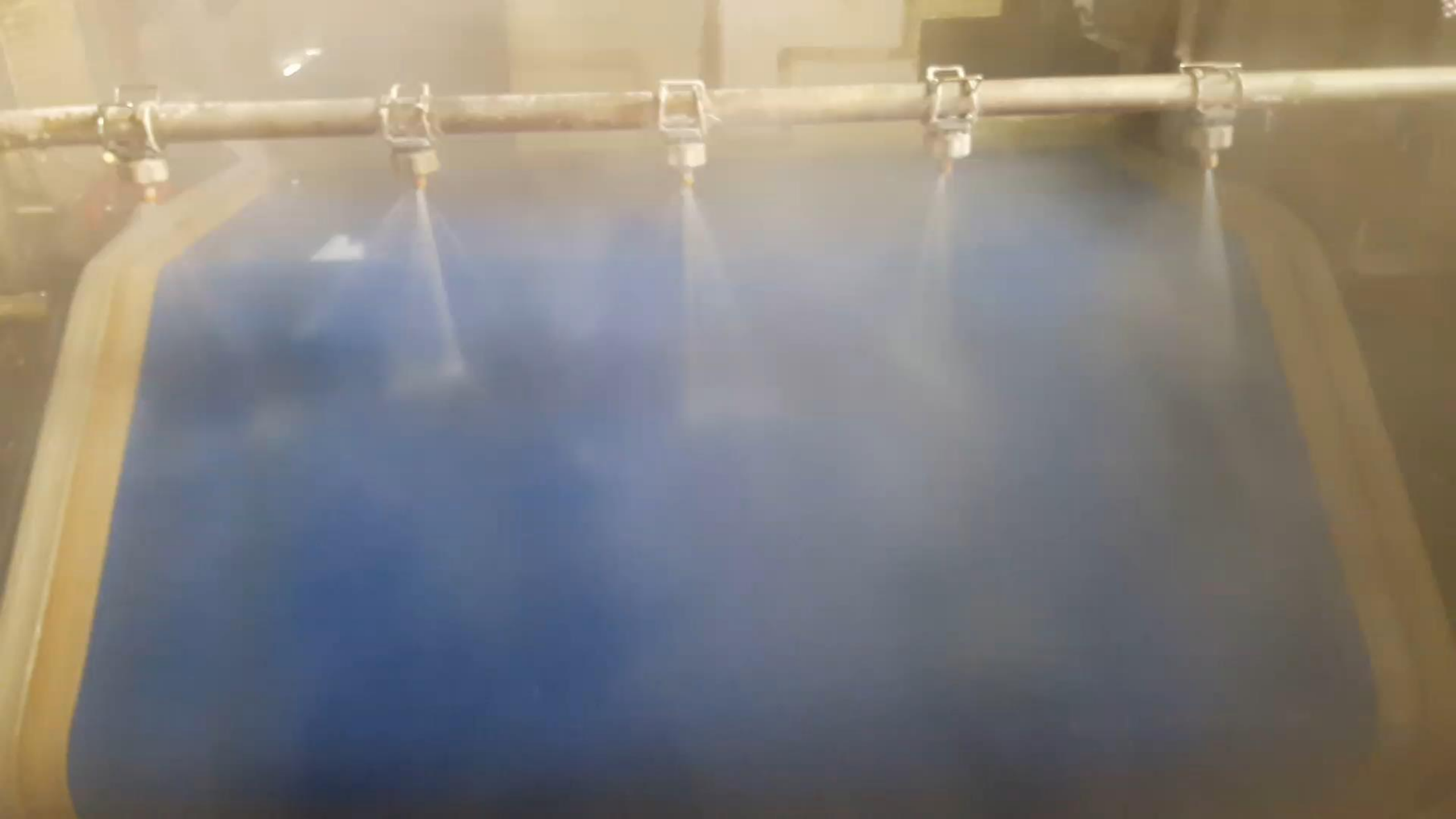
Mineral extraído
que hacia parte de la roca



Borato refinado

Beneficiado y refinamiento de borato de sodio







HOT

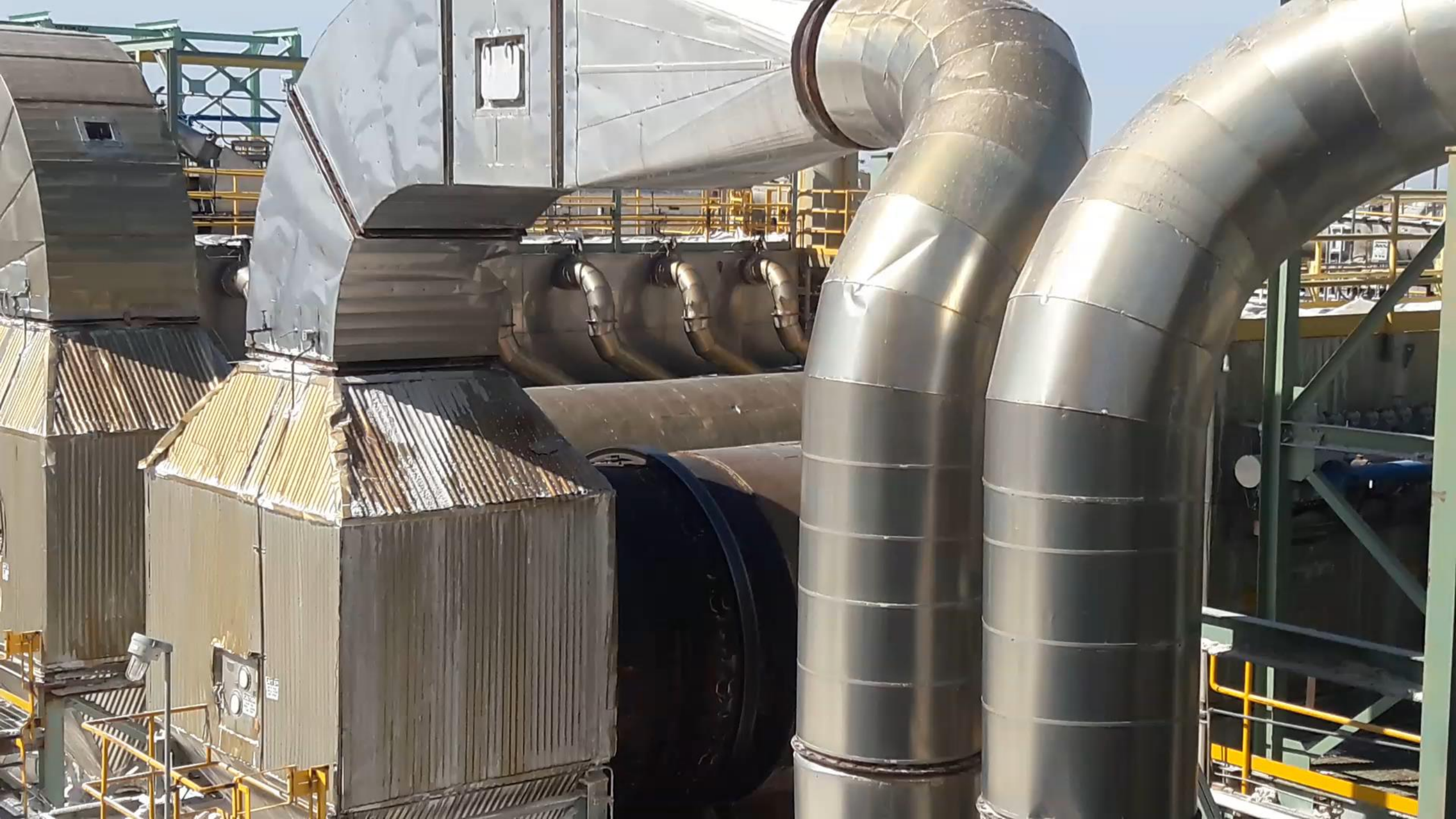
HOT
DO NOT
OPEN BEFORE
STOPPING

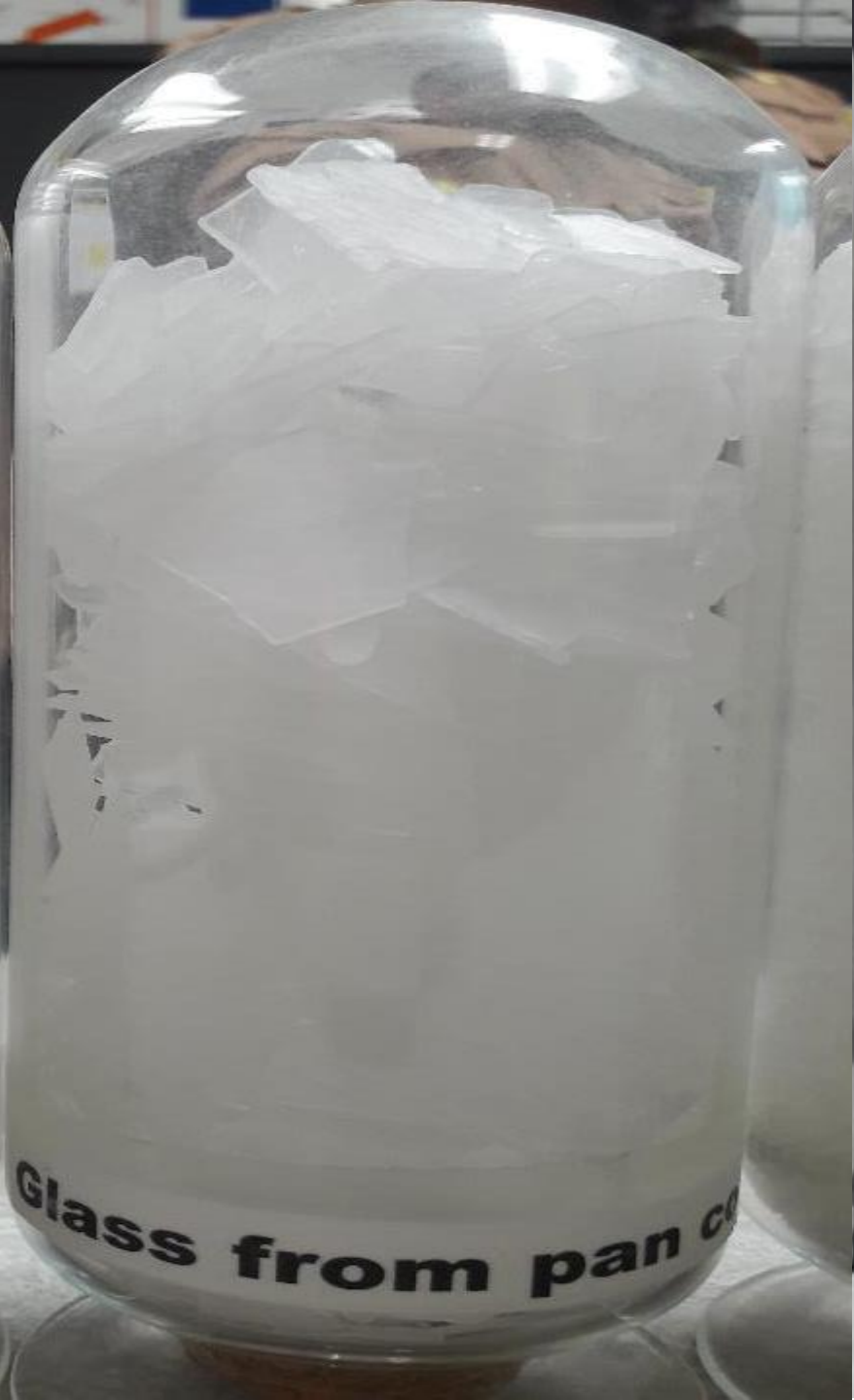
HOT

F1-008

EMCO







Beneficiado de borato de sodio y calcio



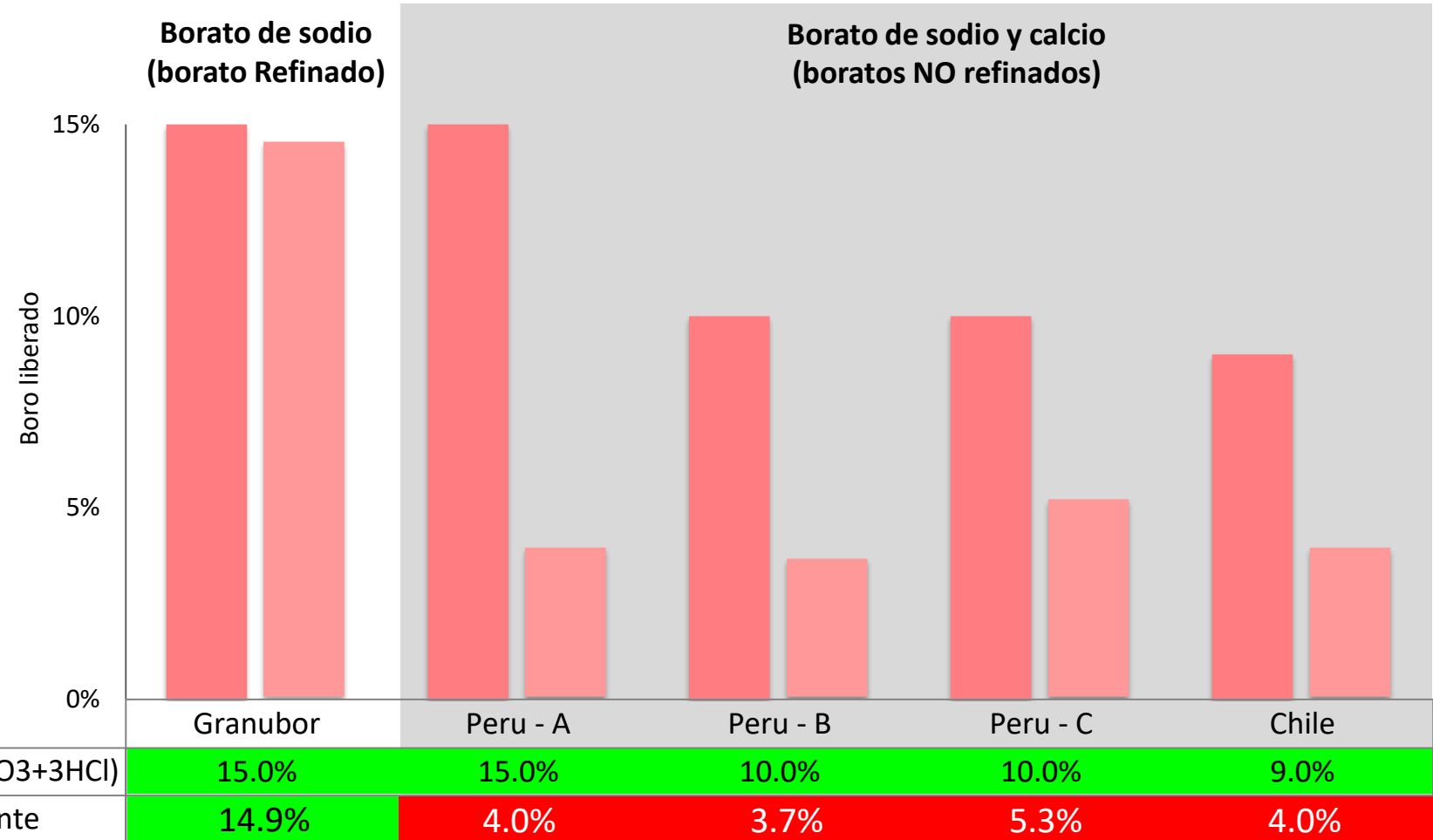
La calcinación se hace para aumentar el %B debido a la alta variabilidad en las fuentes de ulexita. La deshidratación hace a la ulexita aun menos soluble.

Solubilidad de boratos refinados VS NO refinados

Todas las muestras en forma granular

Digestión en ácido fuerte reporte comercial

Extracción en agua caliente



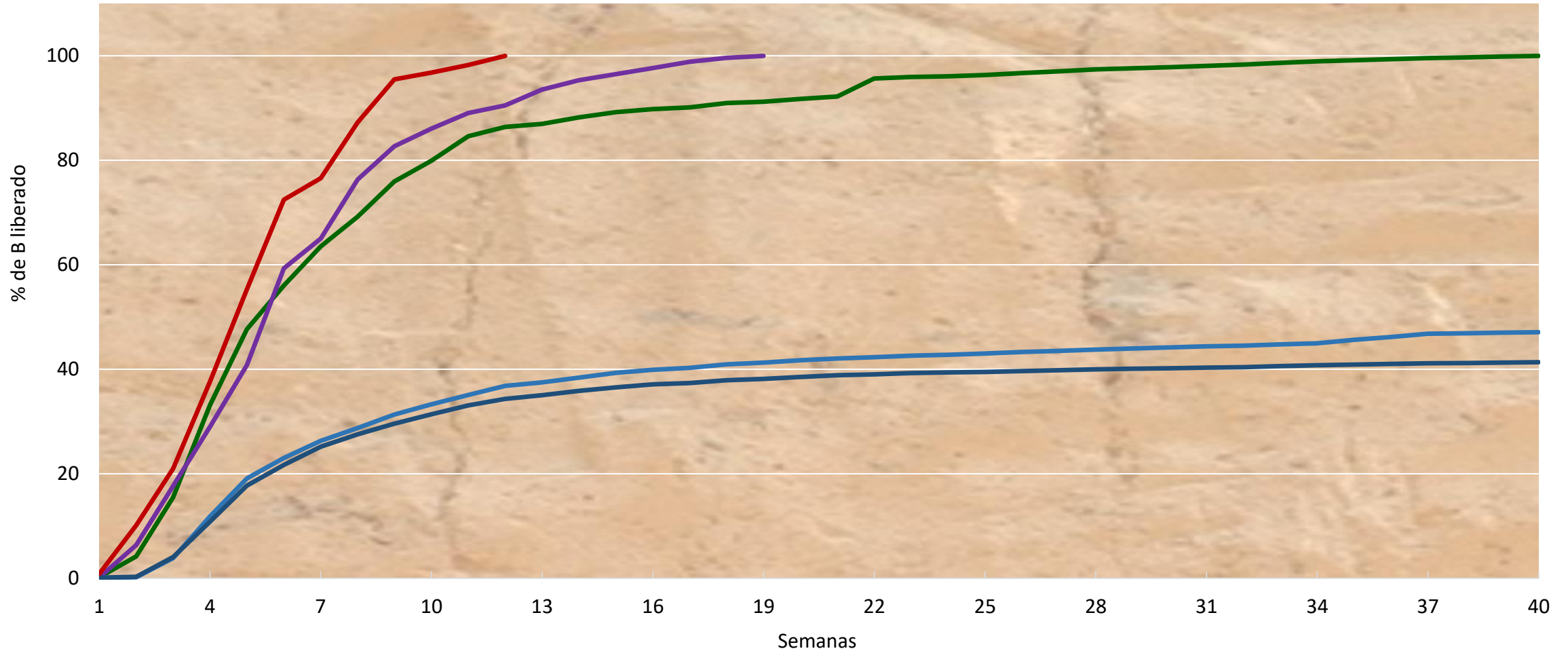
Estudios de disociación de percolación en columnas de PVC



Resultados (Curvas de liberación de B en suelo arenoso, pH 4.7)

Granubor Fertibor Ulexita Arg (10%) Ulexita Bol (10%) Acido borico (Optibor)

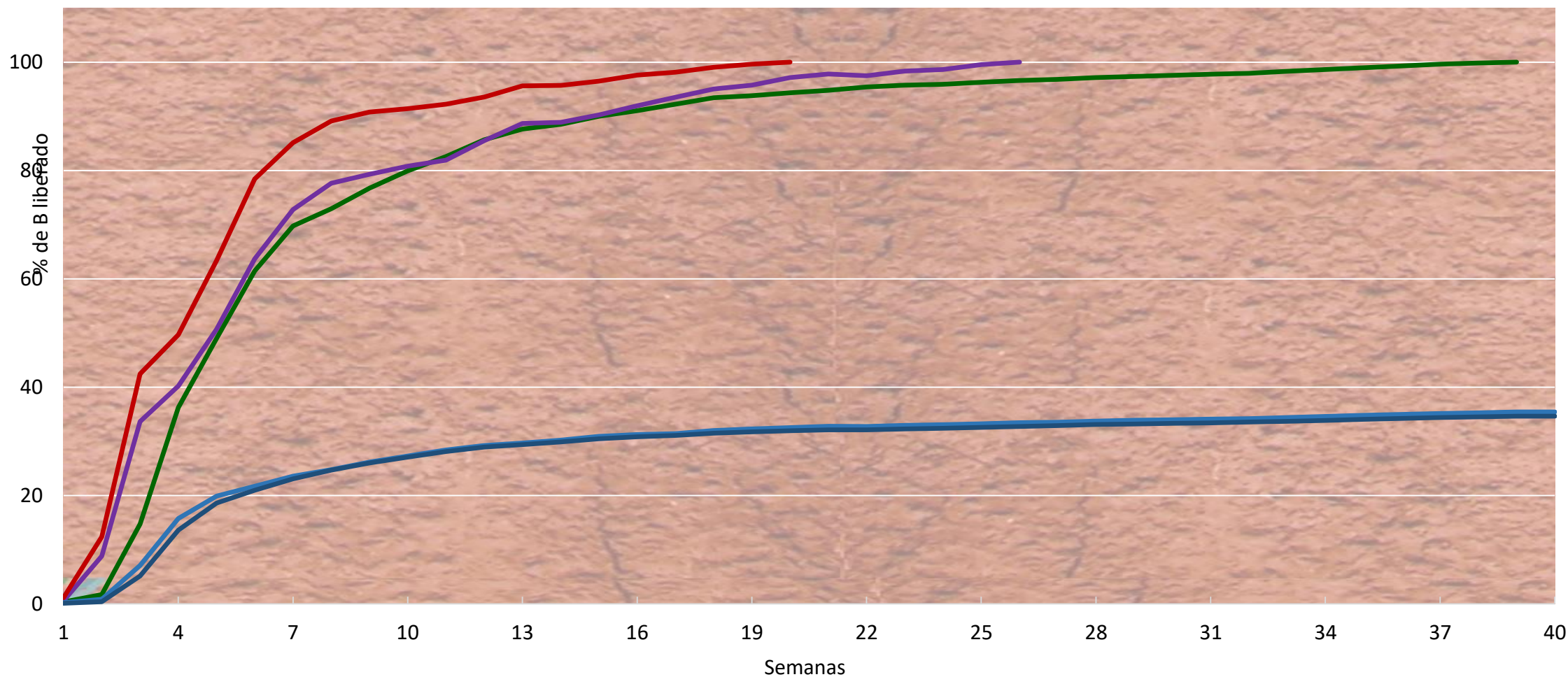
Simulando una precipitación de 2546 mm en el periodo



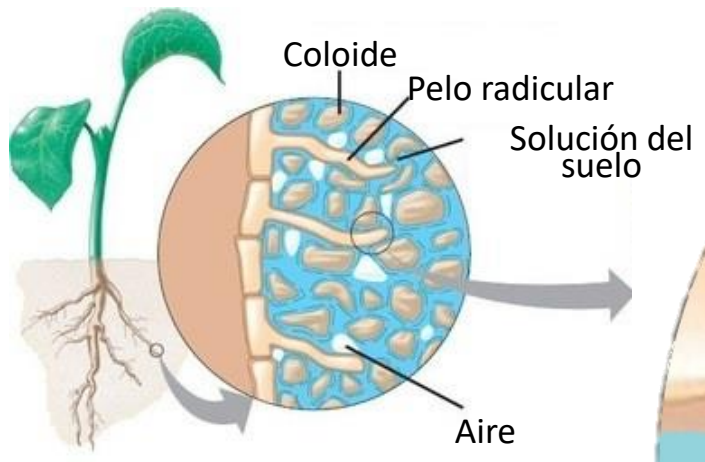
Resultados (Curvas de liberación de B en suelo arcilloso, pH 4.1)

Granubor Fertibor Ulexita Arg (10%) Ulexita Bol (10%) Acido borico (Optibor)

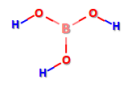
Simulando una precipitación de 4074 mm en el periodo



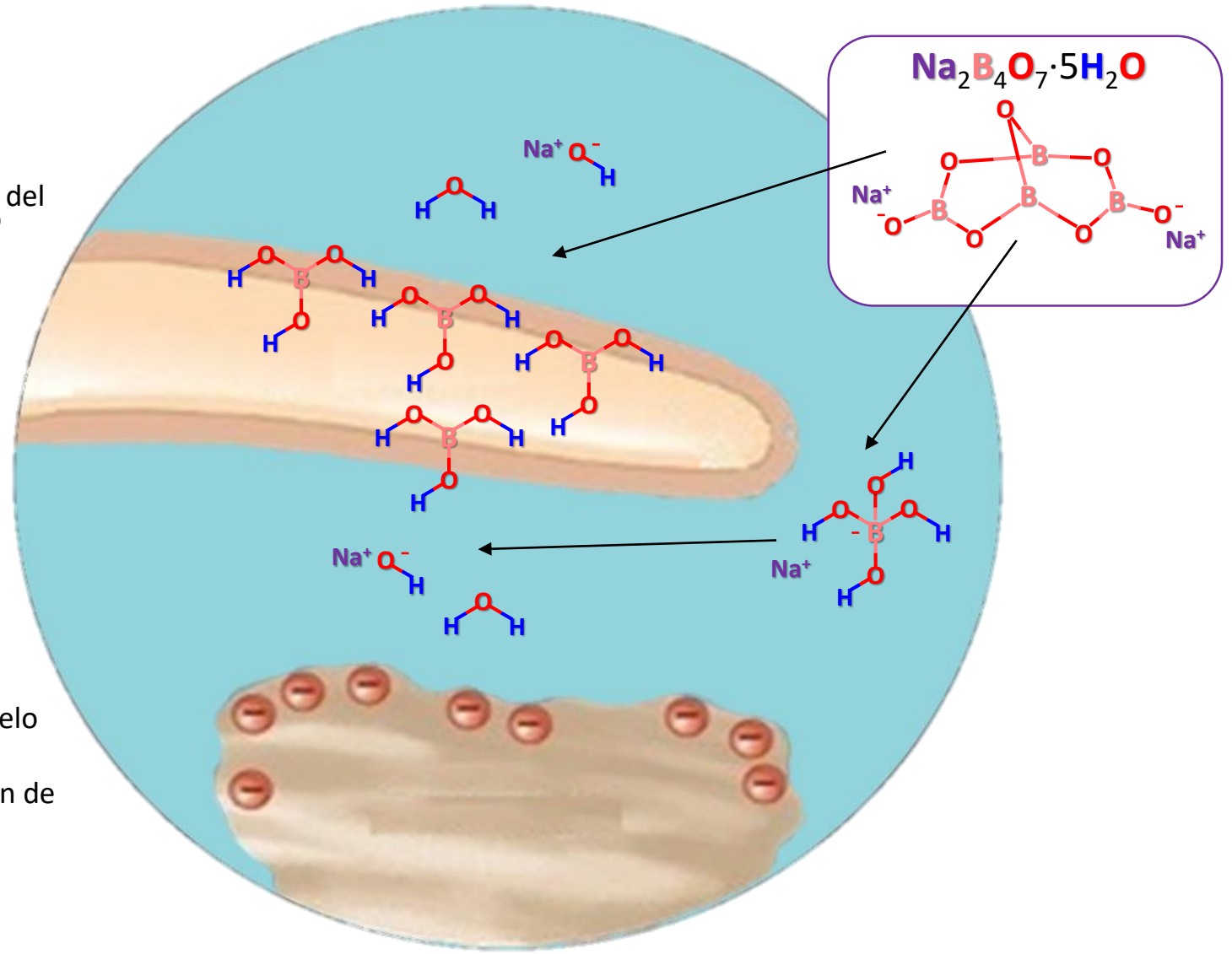
Disociación del tetraborato de sodio en la solución del suelo



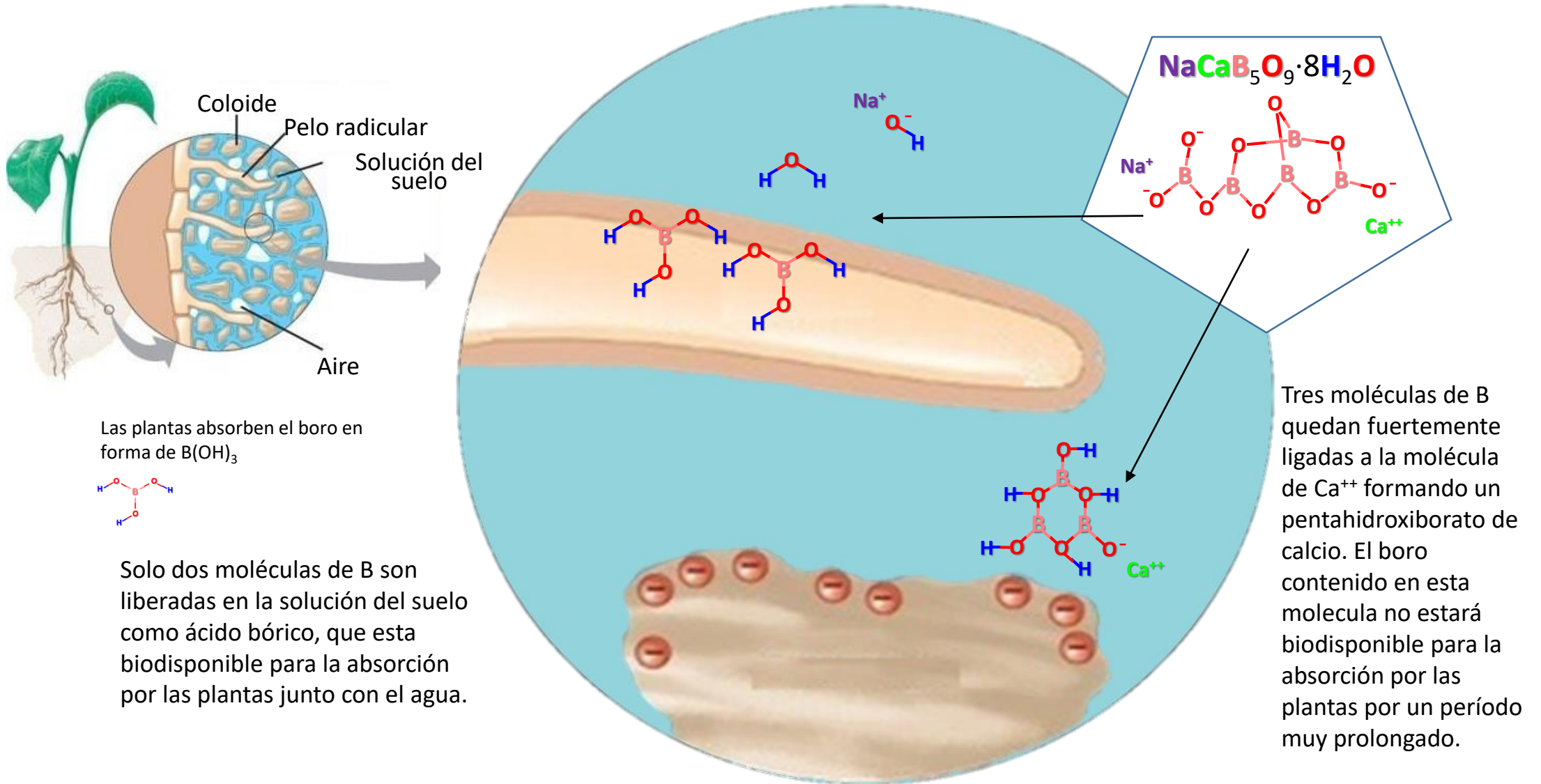
Las plantas absorben el boro en forma de $B(OH)_3$



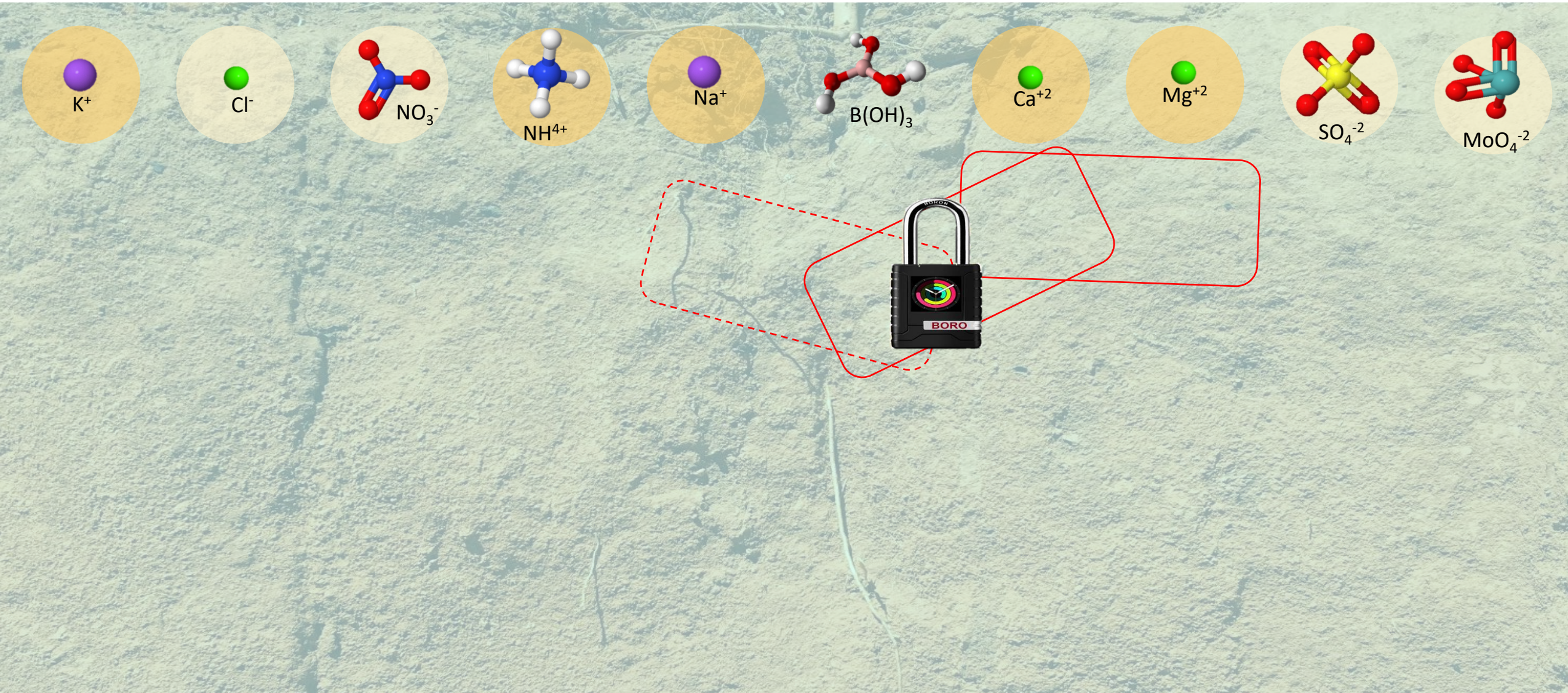
Cuatro moléculas de B son liberadas en la solución del suelo como ácido bórico, que esta biodisponible para la absorción de las plantas junto con el agua.



Disociación del pentaborato de sodio y calcio en la solución del suelo



Un fertilizante boratado de alta eficiencia debe liberar el H_3BO_3 en el suelo de forma gradual y no estar ligado al Ca y el Mg.

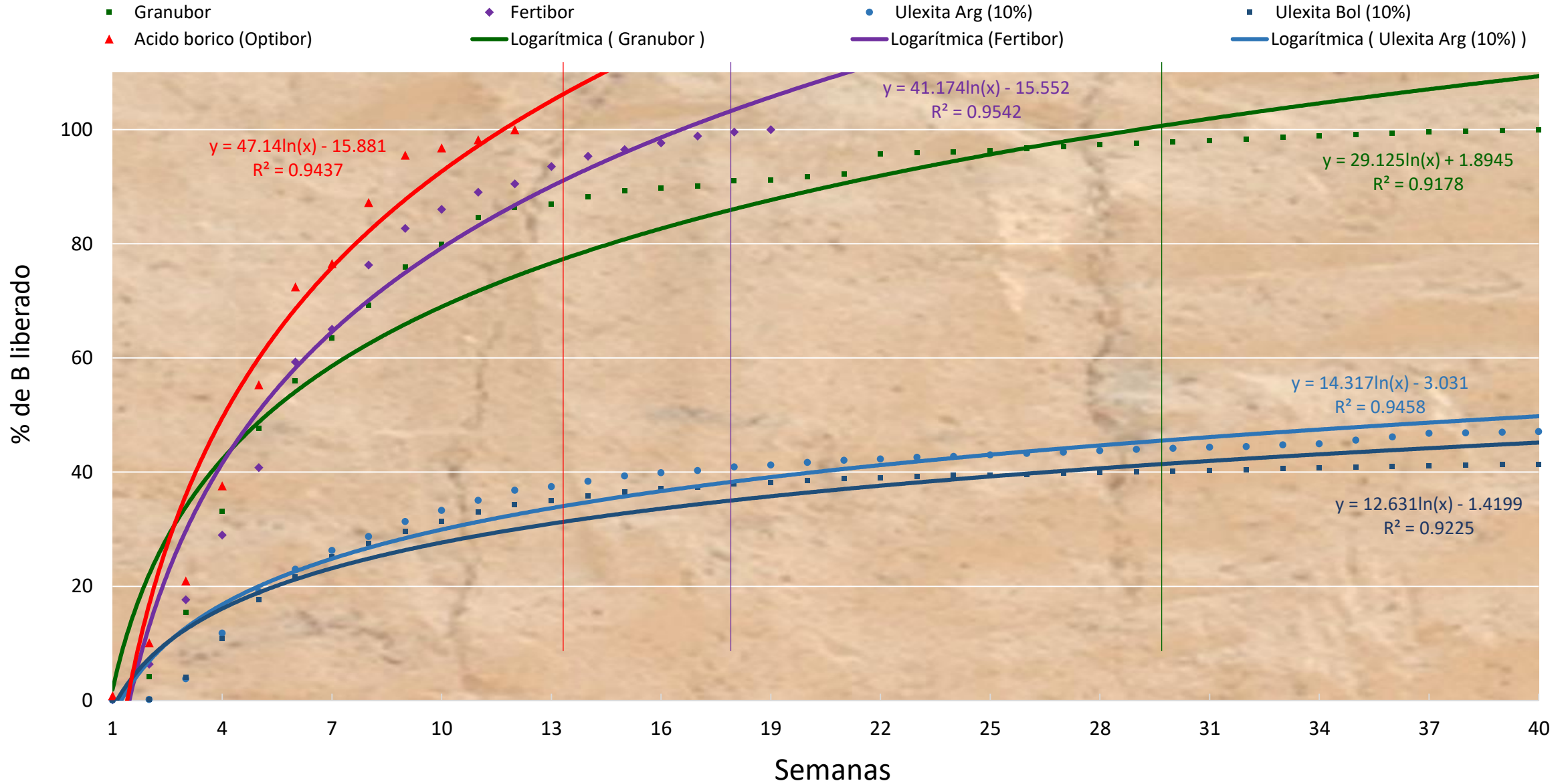


Análisis de los suelos al final del estudio de bioliberación

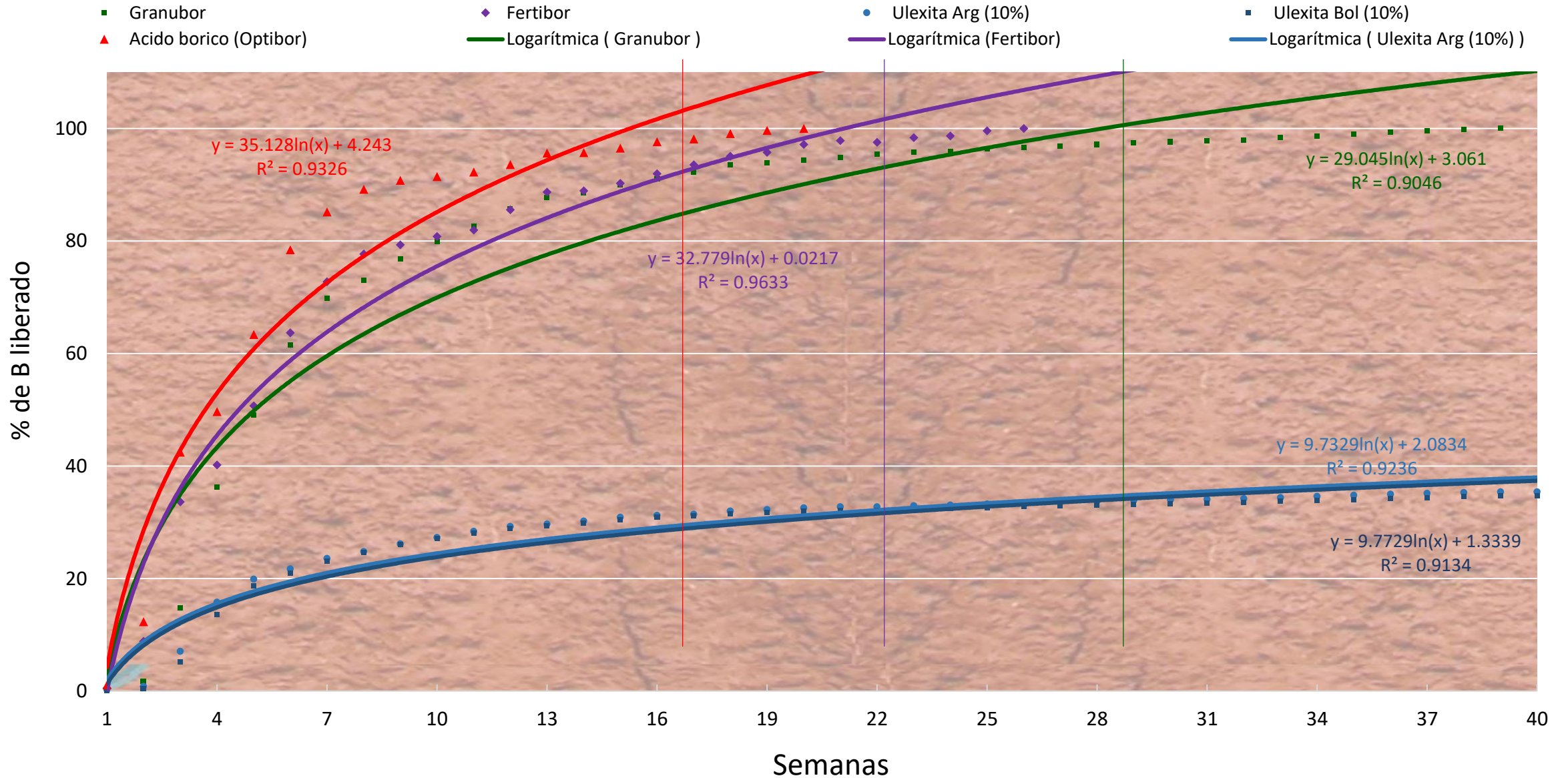
Tratamiento	Contenido de B en mg dm ⁻³	
	Suelo arenoso	Suelo arcilloso
Boro inicial en los suelos antes del inicio	0.200	0.400
Testigo sin boro	0.146 d	0.403 b
Tetraborato de sodio (Grano grueso)	0.253 bc	0.503 a
Tetraborato de sodio (Grano fino)	0.243 cd	0.510 a
Pentaborato de sodio y calcio (Argentina)	0.353 ab	0.583 a
Pentaborato de sodio y calcio (Bolivia)	0.383 a	0.578 a
Ácido bórico	0.240 cd	0.495 ab

¿En cuanto tiempo estará el B disponible para absorción de las plantas?

Resultados (Tendencia logarítmica de liberación de B en suelo arenoso, pH 4.7)



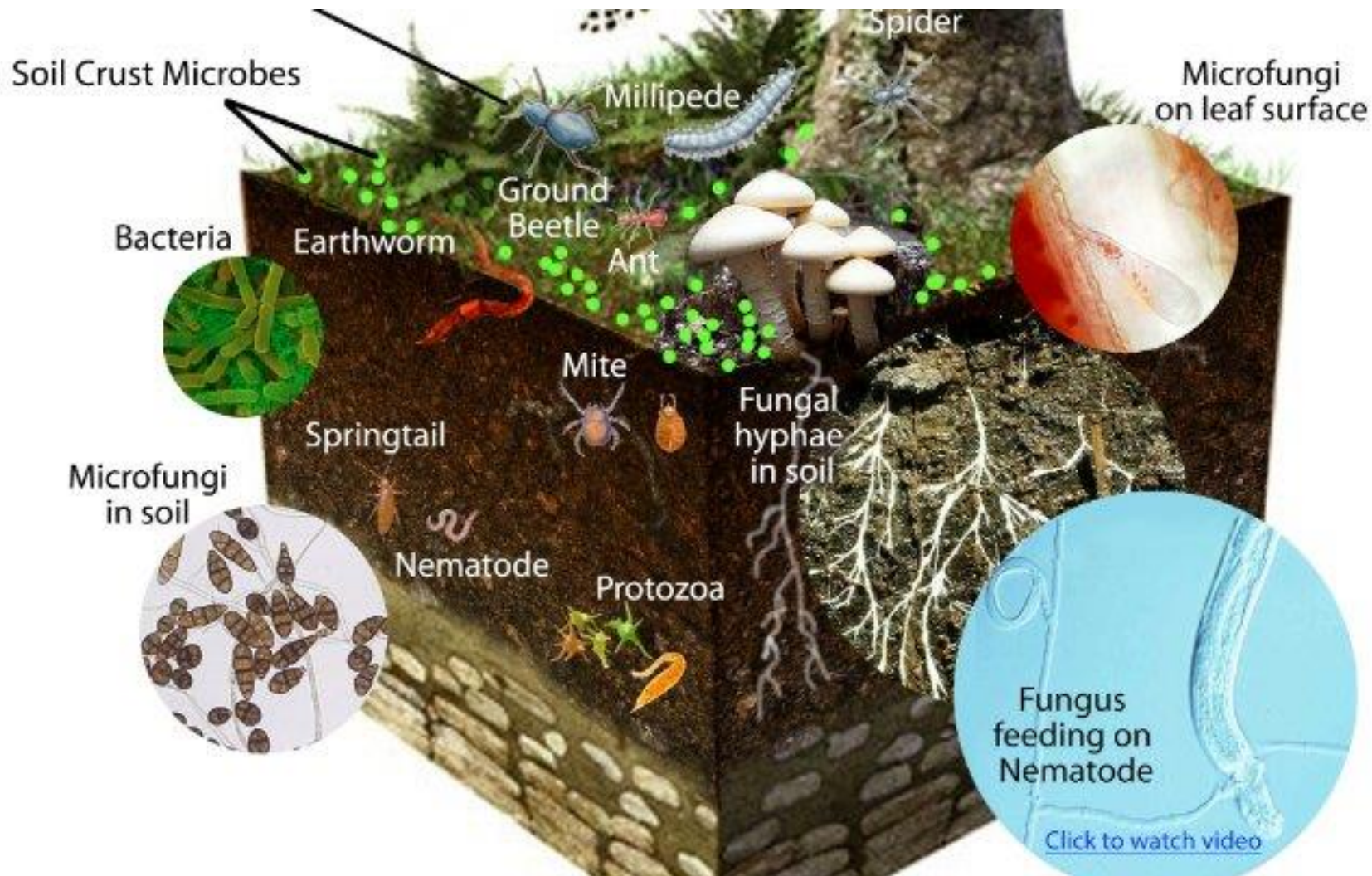
Resultados (Tendencia logarítmica de liberación de B en suelo arcilloso, pH 4.1)



De acuerdo con las tendencias logarítmicas, ¿Cuanto tiempo se requiere para que el contenido de B en las diferentes fuentes, llegue a alcanzar el 100% de biodisponibilidad para las plantas?

Suelo	Fuente	Marca Comercial	R ²	Formula de la tendencia logarítmica	Tiempo calculado para liberar el 100% de B		
					X = Semanas	AAA	MM DD
Arenoso	Ácido Bórico (polvo)	Ácido Bórico	0.9437	$Y = 47.14\ln(x) - 15.881$			
Arcilloso	Ácido Bórico (polvo)	Ácido Bórico	0.9326	$Y = 35.128\ln(x) + 4.243$			
Arenoso	Borato de sodio (grano fino)	Fertibor	0.9178	$Y = 41.174\ln(x) - 15.552$			
Arcilloso	Borato de sodio (grano fino)	Fertibor	0.9633	$Y = 32.779\ln(x) + 0.0217$			
Arenoso	Borato de sodio (granulado)	Granubor	0.9437	$Y = 29.125\ln(x) + 1.8945$			
Arcilloso	Borato de sodio (granulado)	Granubor	0.9046	$Y = 29.045\ln(x) + 3.061$			
Arenoso	Borato de sodio y calcio (granulado)	Ulexita Argentina	0.9458	$Y = 14.317\ln(x) - 3.031$			
Arenoso	Borato de sodio y calcio (granulado)	Ulexita Bolivia	0.9225	$Y = 12.631\ln(x) - 1.4199$			
Arcilloso	Borato de sodio y calcio (granulado)	Ulexita Argentina	0.9236	$Y = 9.7329\ln(x) + 2.0834$			
Arcilloso	Borato de sodio y calcio (granulado)	Ulexita Bolivia	0.9134	$Y = 9.7729\ln(x) + 1.3339$			

"Todas as coisas são venenosas e nada é sem veneno, é a dose que faz o veneno". Paracelso¹



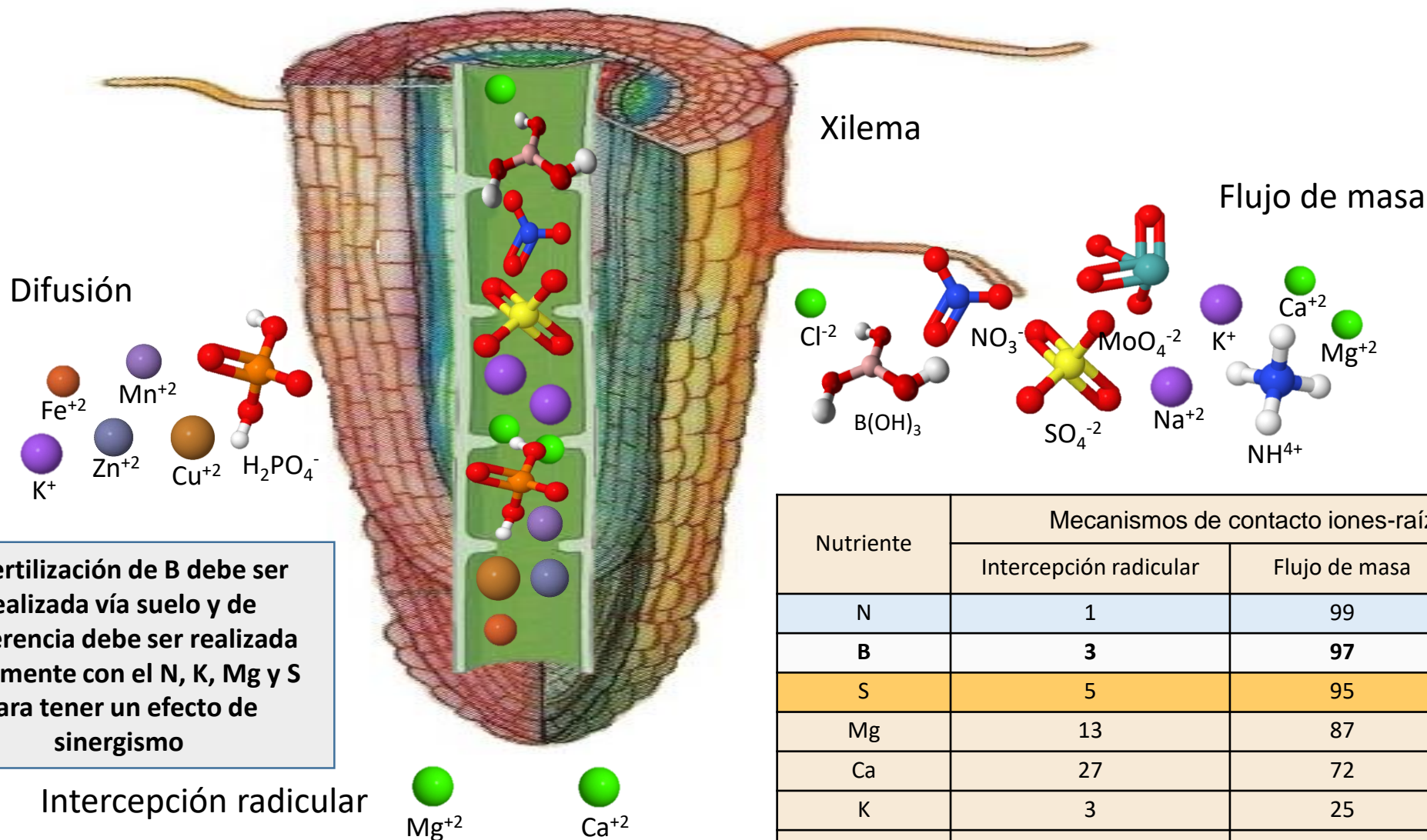
1. Die dritte Defension wegen des Schreibens der neuen Rezepte," *Septem Defensiones* 1538. Werke Bd. 2, Darmstadt 1965, p. 510

Em 2010, Leonie Becker, Adam Scheffczyk, Bernhard Förster, Jörg Oehlmann, Juliska Princz, Jörg Römbke e Thomas Moser do Instituto Soil Science and Soil Conservation, Research Centre for BioSystems, Land Use and Nutrition de Alemanha avaliaram o efeito do ácido bórico em vários macro e microorganismos

Test organism	Endpoint	EC ₅₀ (l/u 95% cl) [mg/kg soil (dw)]
Nitrogen transformation	Nitrate formation	>2,400
<i>Avena sativa</i>	Biomass fw; Shoot length	182 (119/281); 308 (n. d.)
<i>Brassica napus</i>	Biomass fw; Shoot length	175 (164/187); 357 (354/361)
<i>Caenorhabditis elegans</i>	Reproduction	747 (589/949)
<i>Enchytraeus crypticus</i>	Reproduction	220 (208/233)
<i>Enchytraeus luxuriosus</i>	Reproduction	228 (201/259)
<i>Eisenia fetida</i>	Reproduction	484 (465/504)
<i>Folsomia candida</i>	Avoidance	1,441 (183/478,293)
<i>Poecilus cupreus</i>	Food uptake	1,342 (249/27,465)

- Quantidade de informação sobre a toxicidade do ácido bórico para organismos do solo (incluindo micróbios e plantas) é suficiente para apoiar a idéia de utilizar este produto químico como substância de referência em testes ecotoxicológicos terrestres.

El fertilizante boratado cuando se encuentra en forma de H_3BO_3 es absorbido por las plantas vía flujo de masa



La fertilización de B debe ser realizada vía suelo y de preferencia debe ser realizada juntamente con el N, K, Mg y S para tener un efecto de sinergismo

Nutriente	Mecanismos de contacto iones-raíz (% total)		
	Intercepción radicular	Flujo de masa	Difusión
N	1	99	0
B	3	97	0
S	5	95	0
Mg	13	87	0
Ca	27	72	0
K	3	25	72
P	2	4	94

El boro actúa como un catalizador para la mayoría de los nutrientes

Antagonismo

Disponibilidad disminuye para las plantas debido a la acción del otro nutriente

Sinergismo

Aumenta la disponibilidad para las plantas, porque los nutrientes aumentan el nivel adecuado en relación a otros nutrientes

Boro

N

La enzima ureasa es inhibida por el ácido bórico (Power & Woods 1997). El B estabiliza la membrana interna de los glicolipidos en la cobertura de los heterocistes y retarda la difusión del O₂ (Garcia-Gonzales et al., 1991)

P

El B tiene un rol importante en el transporte del P a través de las membranas (Pollard *et al.*, 1977)

K

La absorción del K aumenta en la presencia del B y difícilmente ocurre en su ausencia (Power & Woods, 1997)

El nivel óptimo de boro aumenta la permeabilidad al potasio en la membrana celular (Shorrocks, 1990)

Mg

El B interactúa con el Mg y el P para permitir la fotosíntesis (Teasdale and Richards, 1990)

Ca

El B junto con el Ca, desempeñan un papel importante en el metabolismo de la pared celular y son necesarios en el transporte de auxina (Dela-Fuente et al., 1986). El boro protege al Ca en la pared celular (Yamanouchi, 1971)

Al

El B disminuye la toxicidad causada por el aluminio (Riaz et al. (2018)

Fe

Los niveles de B influyen la absorción y translocación del Fe, paralelamente a la producción de materia seca (Wortman et al., 2013)

Mn

La deficiencia de B reduce la absorción de Mn y limita el crecimiento de las raíces (Alvarez, et al., 1980)

Zn

El B juntamente con el Zn desempeñan un optimo funcionamiento en la ATPase y en los sistemas redox de la membrana plasmática (Lawrence et al. 1995)

Dosis

— Alta

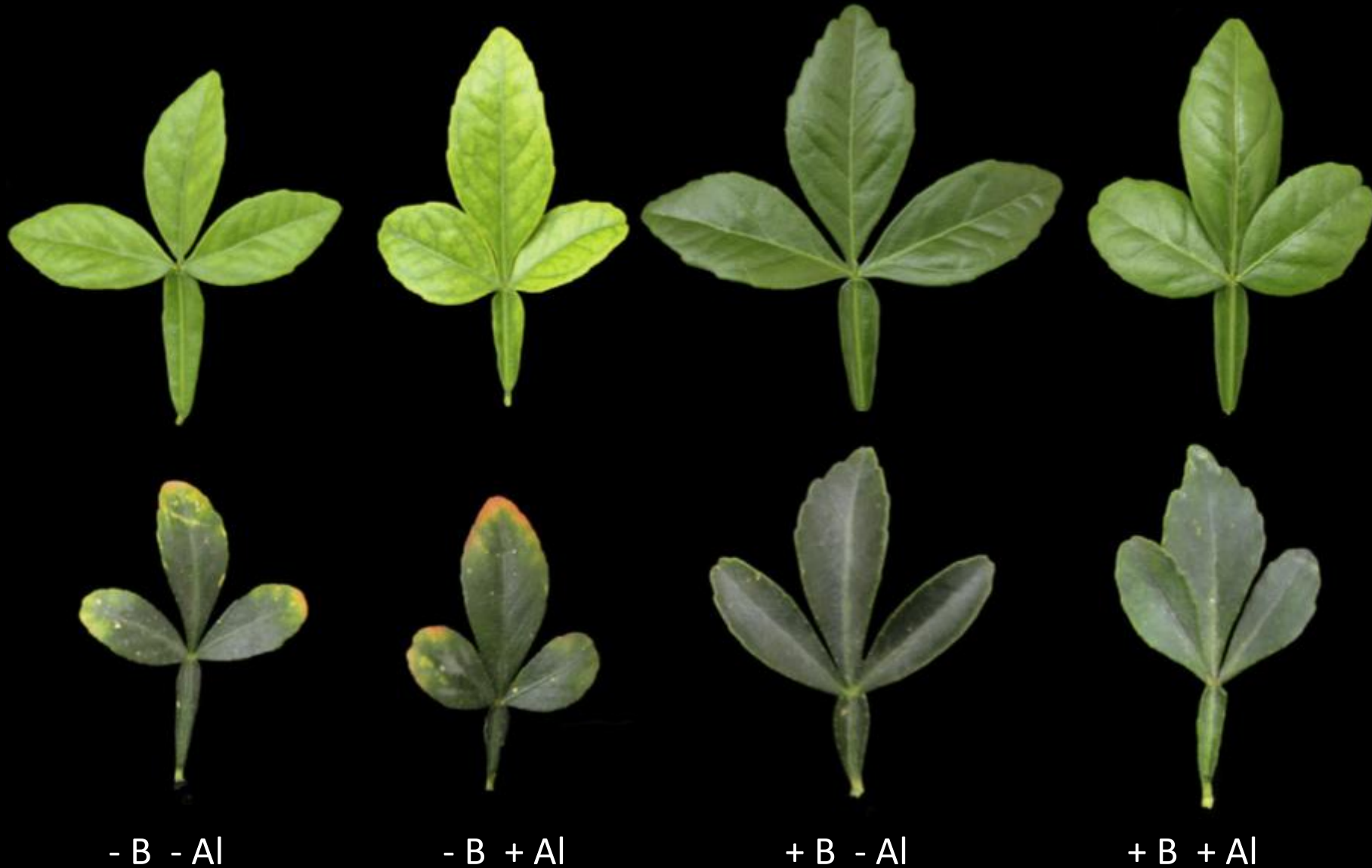
- - - Optima

..... Baja

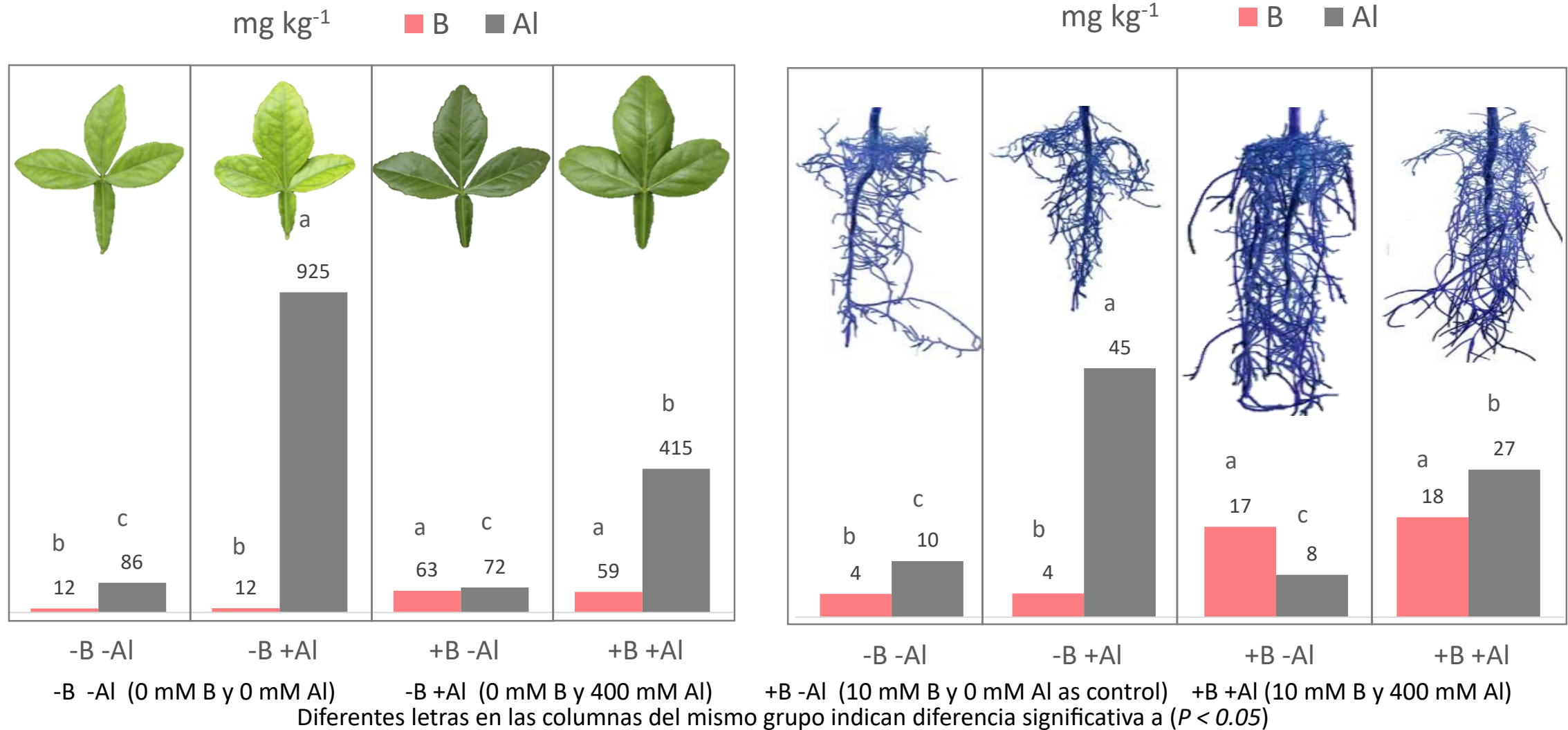
El importante papel del boro en la disminución de la toxicidad causada por el aluminio en la citricultura fue demostrado por *Riaz et al. (2018)*, donde el B actuó en la regulación de múltiples procesos fisiológicos reduciendo el daño a las células de la raíz:



El importante papel del boro en la disminución de la toxicidad del aluminio en la citricultura fue demostrado por *Riaz et al. (2018)*, donde el B actuó en la regulación de múltiples procesos fisiológicos en la activación de sistemas de defensa de las plantas:

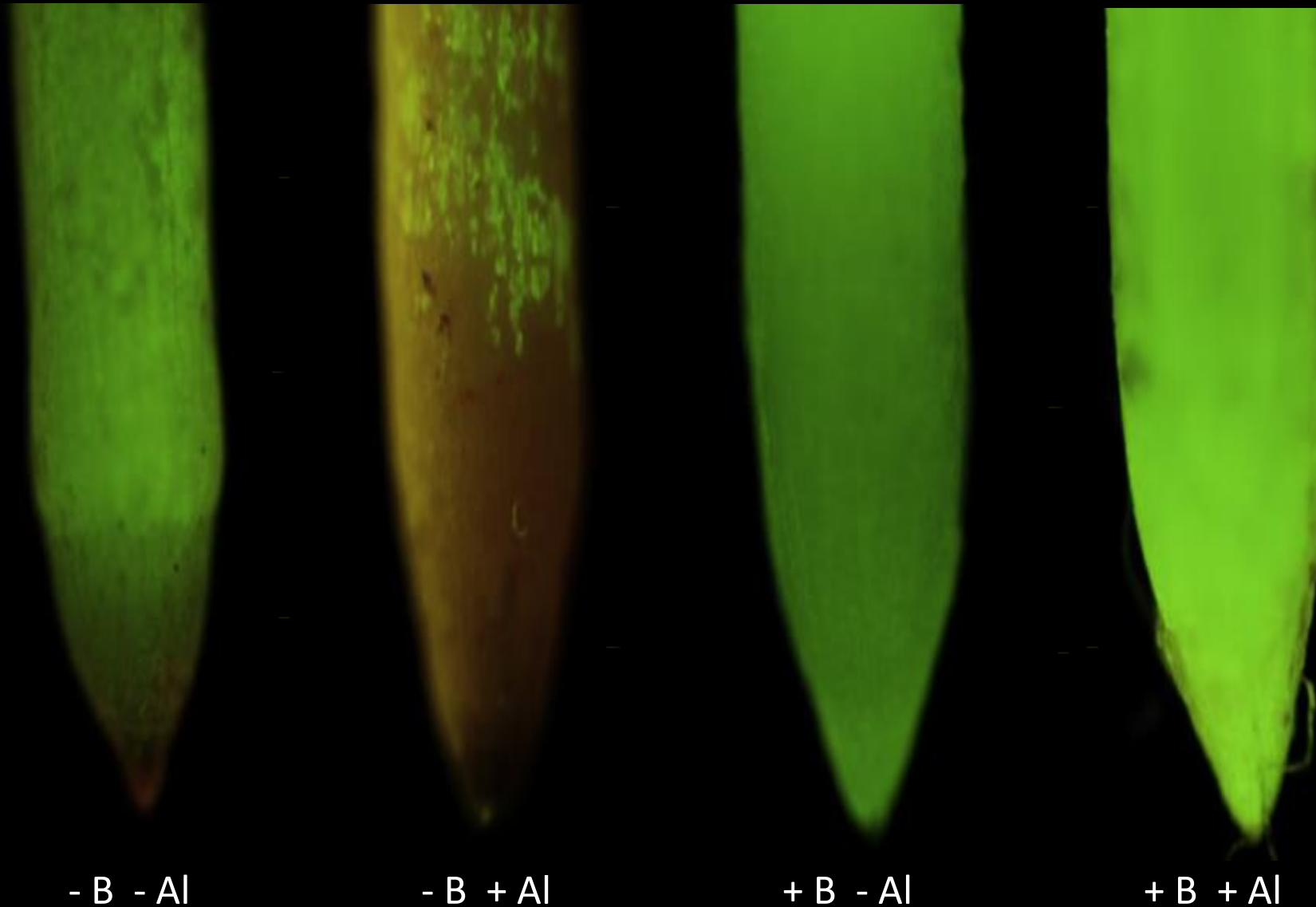


El boro disminuye la toxicidad causada por el aluminio a las plantas



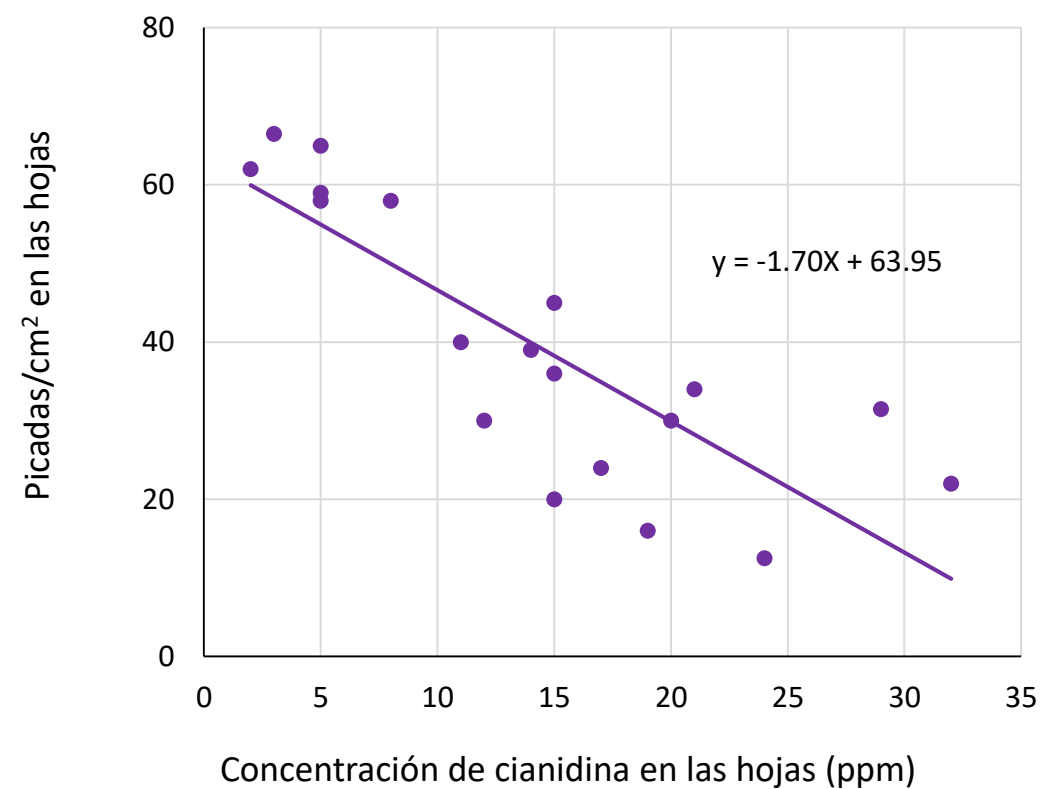
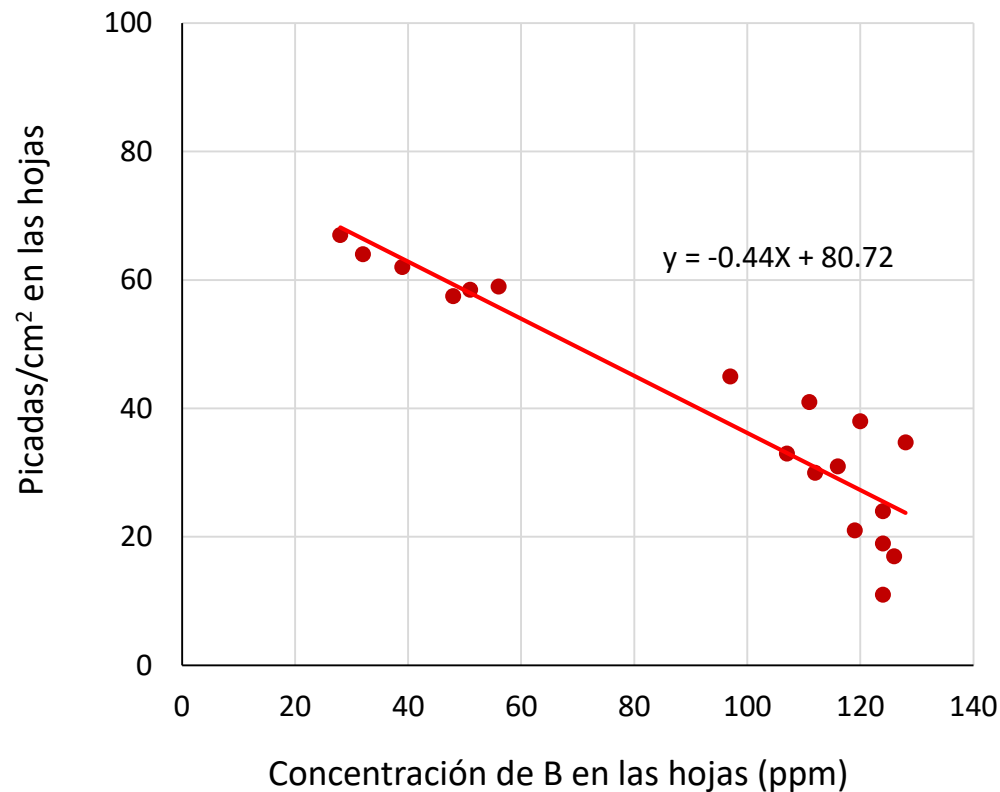
Conclusión: El estudio de Riaz et al., demostró que el suministro de B puede reducir la inmovilización del Al y restringir la entrada del mismo en el simplasto y así disminuir la toxicidad causada por el Al. Estos resultados resaltan el papel benéfico del B en la respuesta a los efectos tóxicos causados por el Al en la producción agrícola.

El importante papel del boro en la disminución de la toxicidad del aluminio en la citricultura fue demostrado por *Riaz et al. (2018)*, donde el B actuó en la reducción del daño a las células radiculares. Micrografías de fluorescencia de puntas de raíz de cítricos, doblemente teñidas, muestran células intactas (exhibiendo fluorescencia verde debido al diacetato de fluoresceína), mientras que el yoduro de propidio emite fluorescencia roja de los núcleos de células damnificadas.



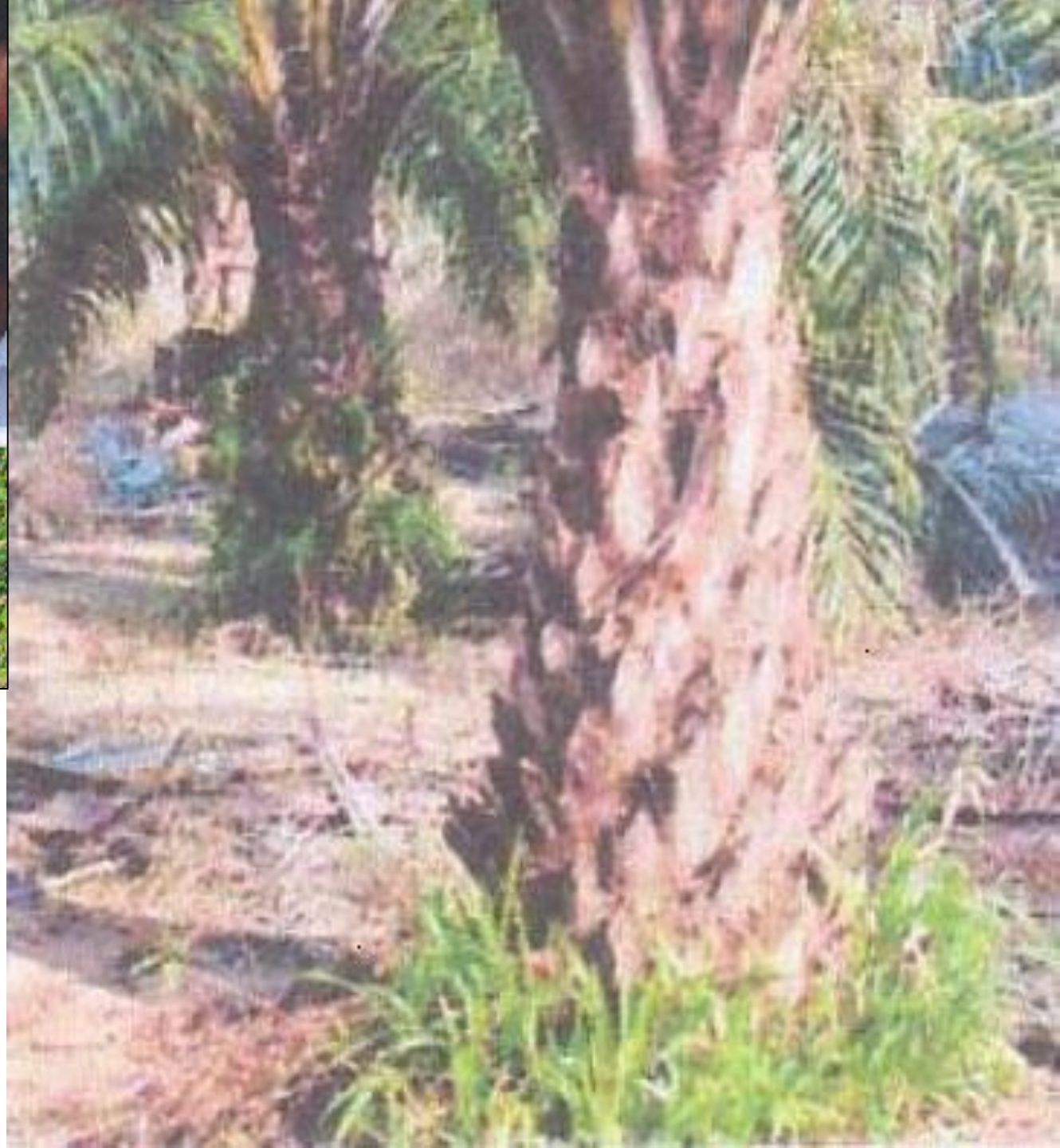
Relación entre el contenido de boro (B) en las hojas de las palmas y el contenido de la cianidina con respecto a la intensidad de ataque del ácaro rojo

Rajaratnam y Hock (1975), observaron que con el aumento en el contenido de boro en las hojas de palma, había una reducción en la infestación de ácaro rojo (*Tetranychus pirooei*) y que había una estrecha correlación entre el contenido de boro y la producción de cianidina, un polifenol que es tóxico a los ácaros rojos, y que puede transformar algunos compuestos nitrogenados complejos haciendolos no digeribles por los ácaros rojos.

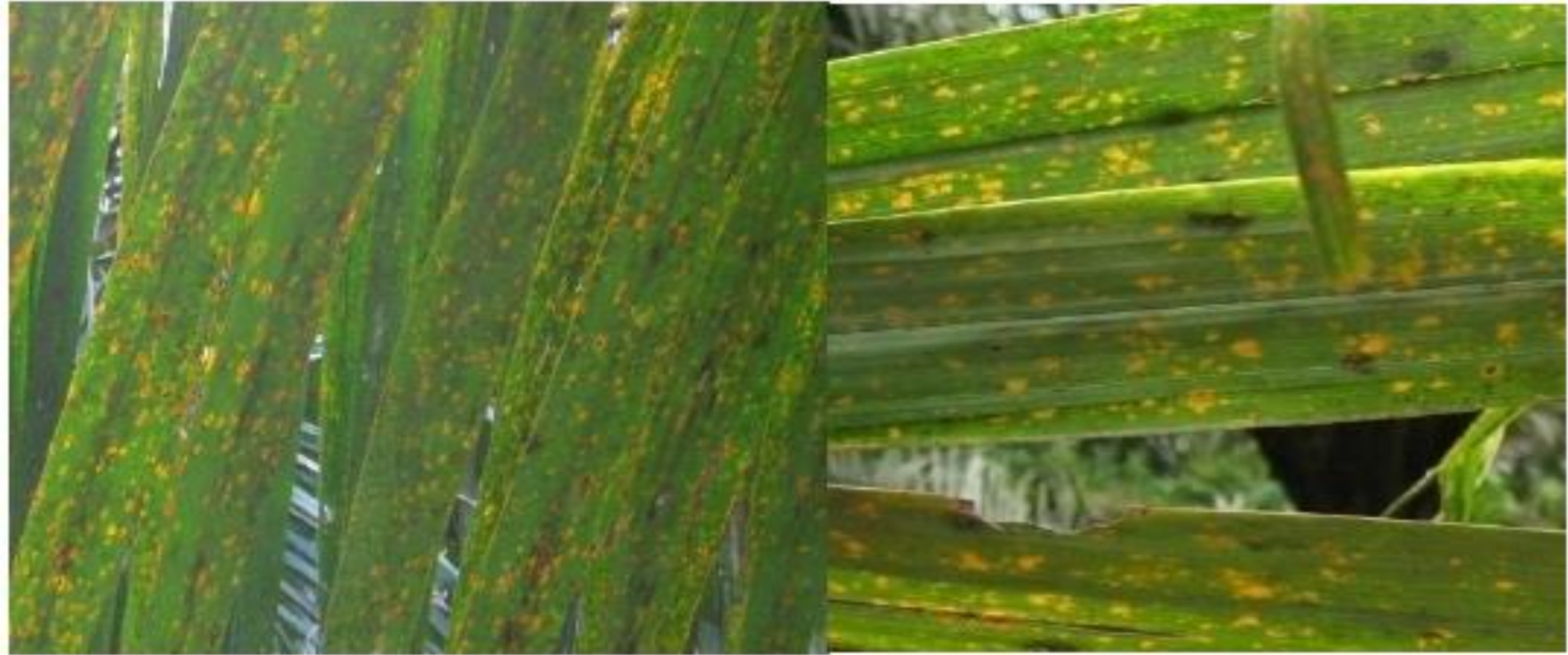




Cuando el boro es deficiente en la palma de aceite la deficiencia de nitrógeno (N) se acentúa y las hojas y raquis se tornan amarillentos y el tejido foliar se enrolla en la nervadura central.



La deficiencia de boro puede acentuar la deficiencia de fosforo (P).
En la palma, el principal síntoma es la disminución del diámetro en la parte superior de la palma.
En los cultivos de cobertura y las gramíneas se verán hojas moradas y pequeñas.



Cuando el boro es deficiente en la palma la deficiencia de potasio se acentúa, ya que el mismo no logra ser retenido en la planta y es vaciado por las raíces. La deficiencia de K son manchas anaranjadas en las hojas jóvenes superiores

El importante papel del boro en la integridad de la membrana fue demostrado por Cakmak et al. (1995), trabajando con girasol.

Comparando las hojas deficientes en boro con las hojas normales observaron que el flujo de algunos compuestos eran mayores en las hojas con deficiencia de boro que en las normales:

- + 35 veces mayor en contenido de potasio (K)
- + 45 veces mayor en contenido de sacarosa
- + 7 veces mayor en contenido de fenoles y aminoácidos.

Suministro de B (μM)	[B] $\mu\text{g.g}^{-1}$ PS	Concentración de vaciado ($\mu\text{g.g}^{-1}$ PF.2h $^{-1}$)			
		K+	Sacarosa	Fenólicos	Aminoácidos
0.01	4.7	630	900	79	163
0.20	11.8	390	440	72	122
1.00	16.7	52	70	17	33
20.00	37.7	18	20	13	23

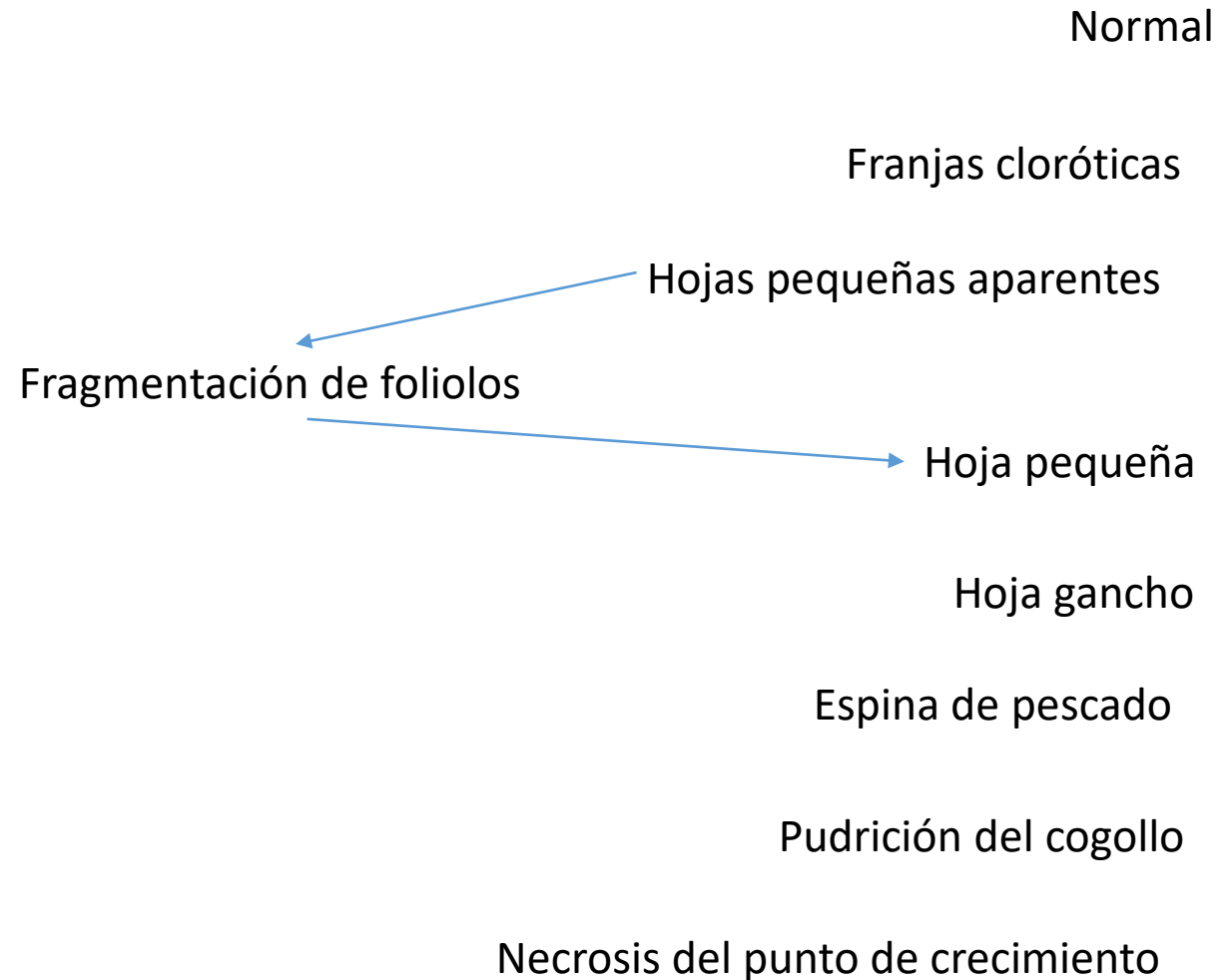
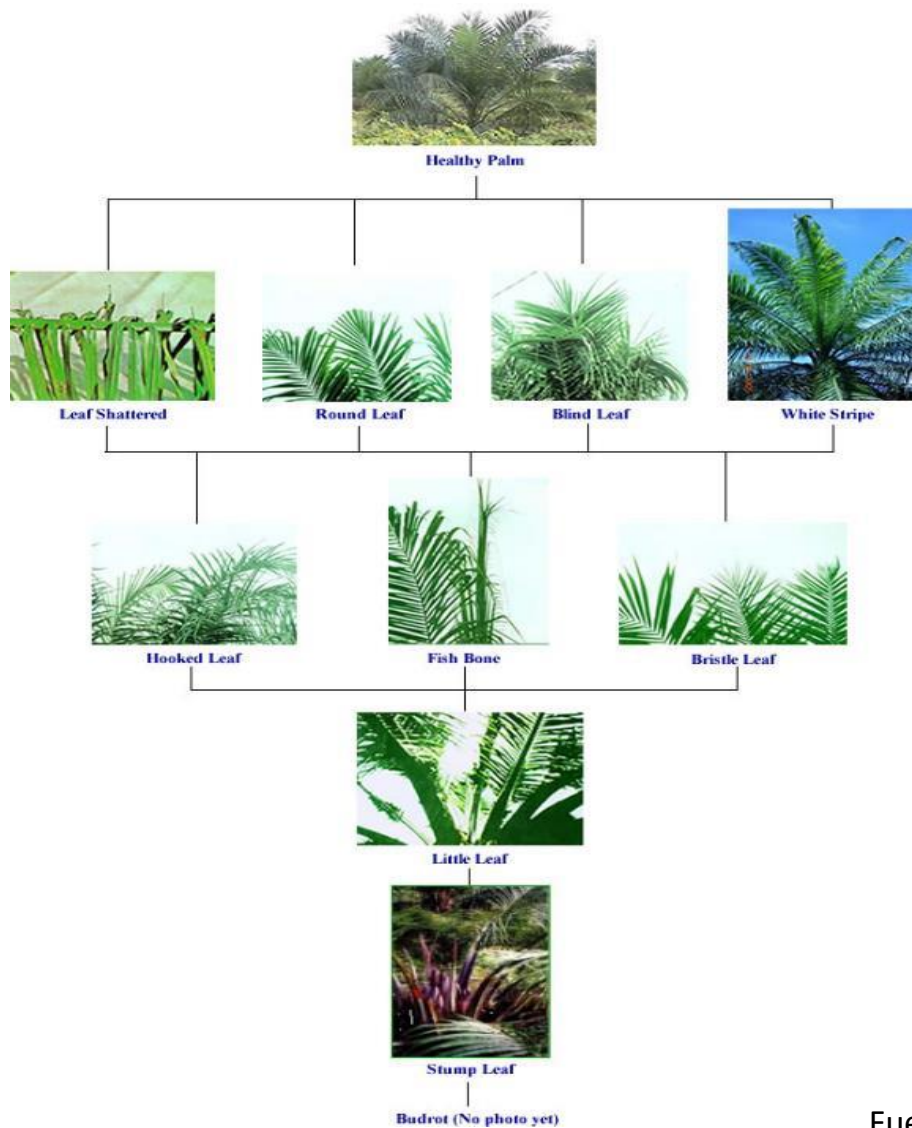
O sea,

La deficiencia de boro, además de disminuir la eficiencia de la fertilización con potasio, libera sacarosa y aminoácidos que son alimento para plagas y patógenos de plantas.



La deficiencia de boro puede acentuar la deficiencia de magnesio (Mg). El principal síntoma es que la terminación de las hojas se vuelven amarillas.

Progresión de la severidad de la deficiencia de boro en palma de aceite



Foliolos retorcidos



Hojas redondeadas



Hojas redondeadas



Hojas ciegas



Hoja ciega



Hoja ciega





Franjas blancas



Franjas blancas



Hojas onduladas



Hojas onduladas

Hojas onduladas





Hojas onduladas

Hojas onduladas y arrugadas



Hojas arrugadas





Hojas acartonadas

Hoja gancho

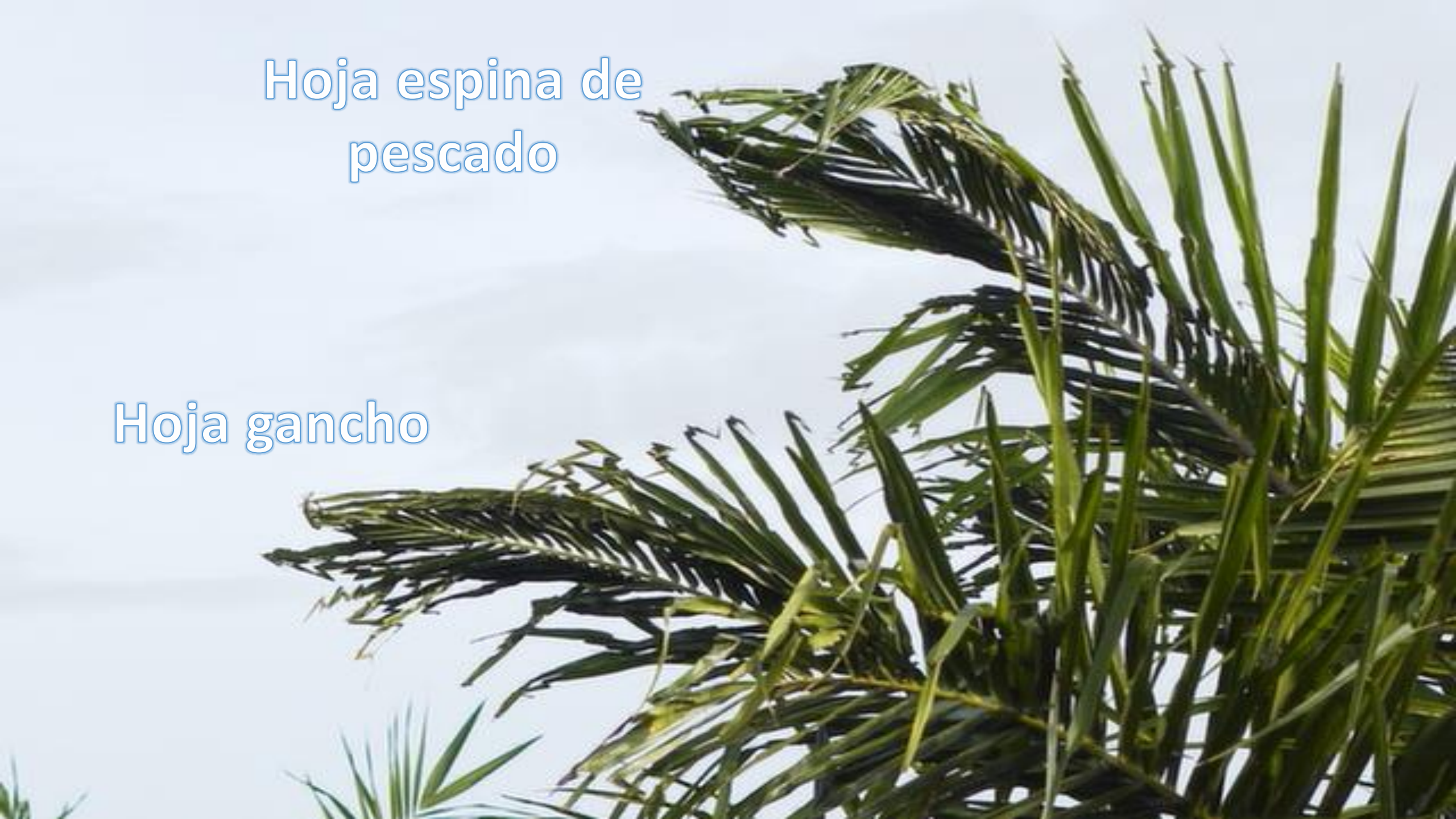




Hoja gancho

Hoja espina de
pescado

Hoja gancho



Espina de pescado



Hoja Pequeña





**Hojas
pequeñas**

Deficiencia de boro conduce a disminuir la polinización



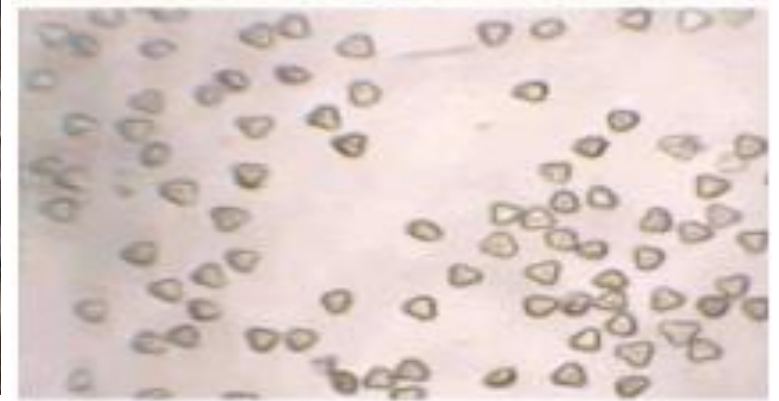
Transferencia de polen viable de las flores masculinas a las femeninas

Agentes viento y agentes polinizadores

Periodo de Antesis
1 – 5 días



Periodo de Antesis 1 – 3 días
La más alta actividad de polinización ocurre en el día 2



Granos de polen germinados y no germinados

Viabilidad del polen: la deficiencia de boro reduce la germinación del polen y la esterilidad masculina.
Palma de aceite - reducción de la viabilidad debido al clima

Fuente: Dr Ramle Moslim

Deficiencia de Boro en frutos frescos conduce a frutos partenocarpicos (sin semilla),
frutos pequeñas



Deficiencia de Boro conduce a disminuir el cuaje de frutos



Buen cuaje de frutos
70% o más

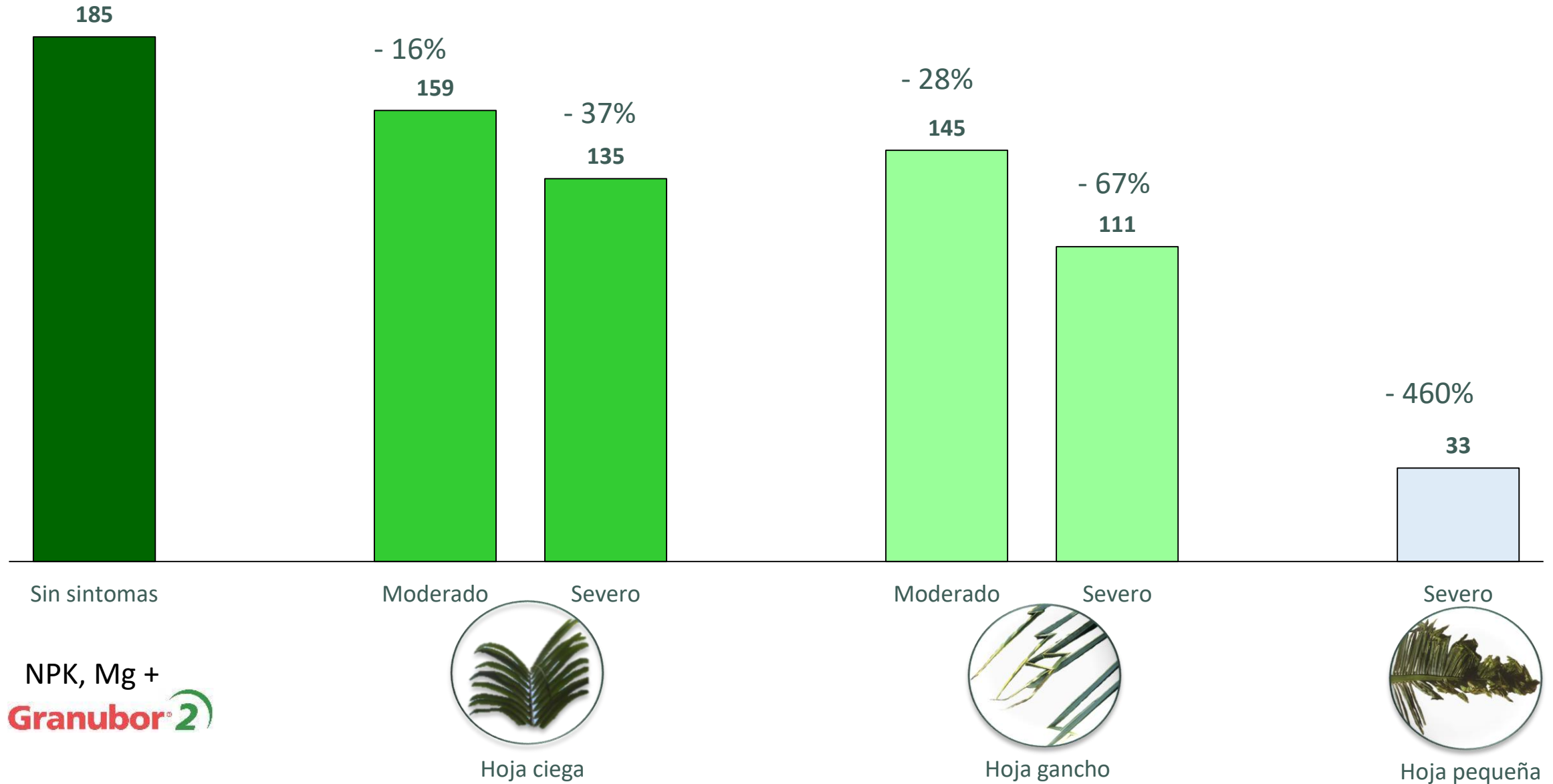


Moderado cuaje de frutos
30 a 70%

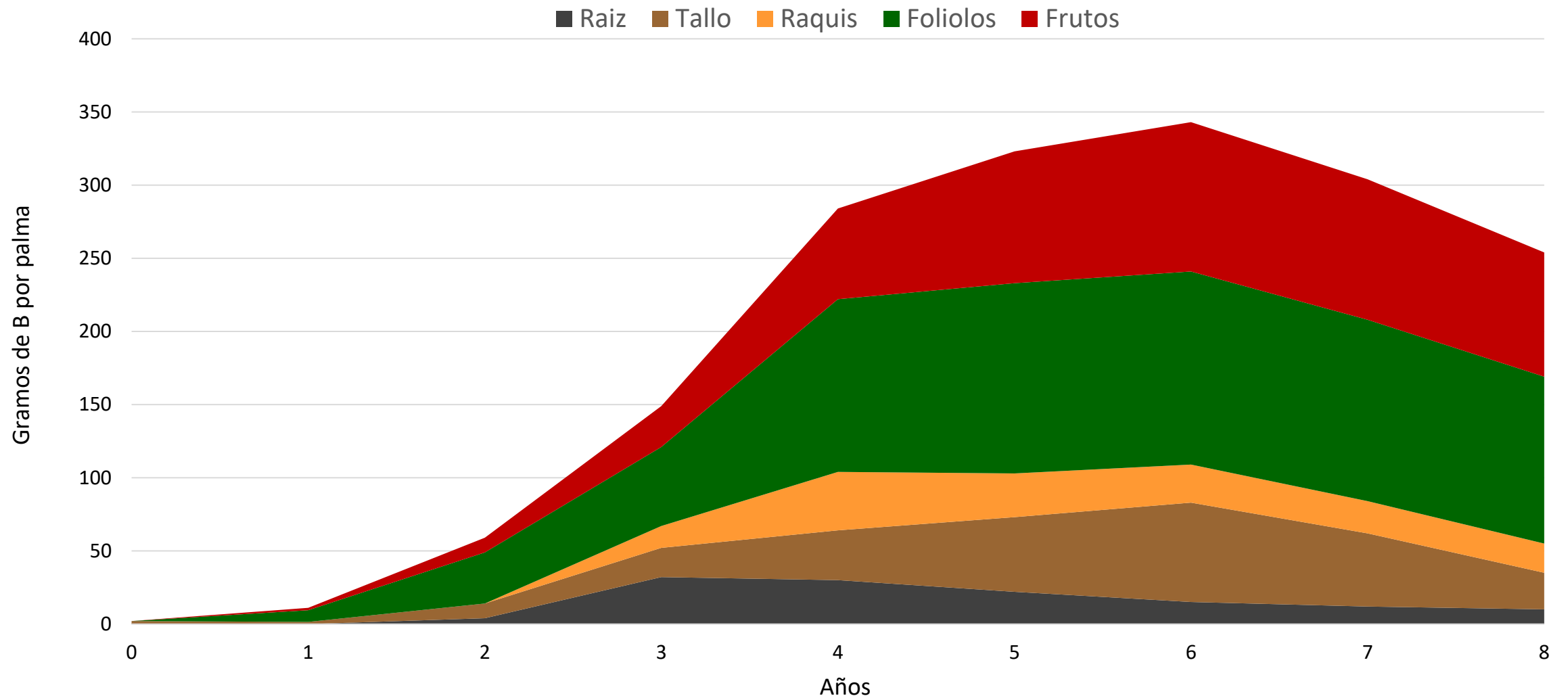


Bajo cuaje de frutos
Menos de 30%

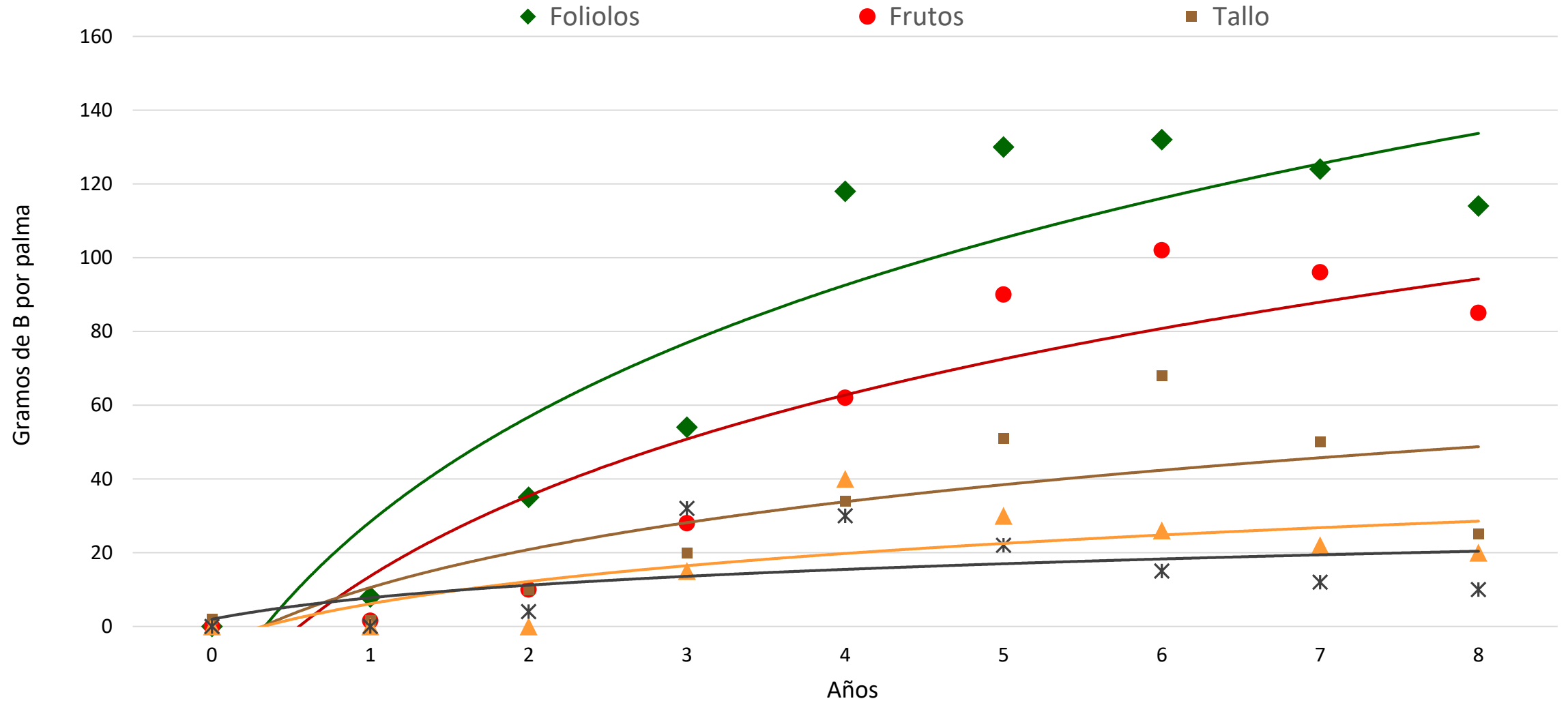
Rendimiento en kilogramos por palma por año



Demanda de boro promedio por palma

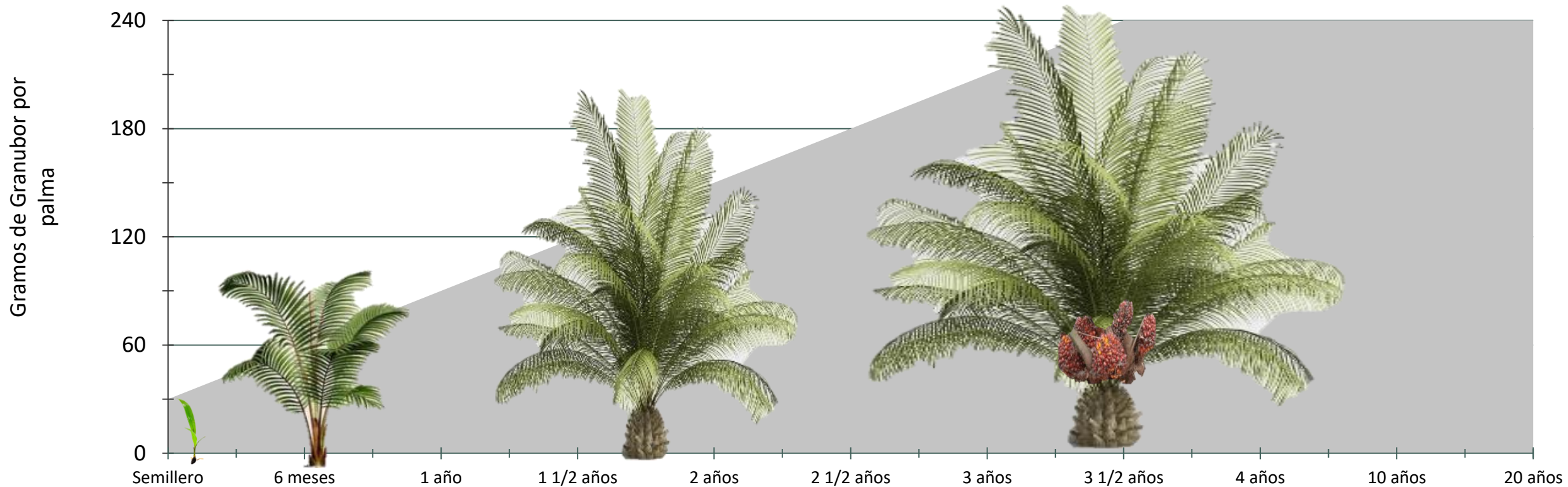


Demanda de boro promedio por palma



Recomendaciones de dosis de Granubor para uso en palma de aceite

Granubor (g/palma)	Edad de la palma						
	6 meses	1 Año	1 ½ Años	2 Años	2 ½ Años	3 Años	3 ½ Años o más
	60	90	120	150	180	210	240



Muchas gracias !!!



<https://agricultura.borax.com/>



marcel.barbier@riotinto.com



[@marcelbarbier](https://twitter.com/marcelbarbier)



+1 720 422 2856



[marcelbarbier](#)