

Relaciones catiónicas y su importancia para la agricultura

Ing. Marco Chaves Solera, M.Sc.

Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar

DIECA-LAICA

mchavez@laica.co.cr.

Introducción

Una revisión histórica de antecedentes de la evolución de la agricultura en nuestro país, revela que gran parte del desarrollo de los cultivos siguió en un inicio criterios empíricos de observación y experimentación, basados en la adaptación de los cultivos a la situación particular del lugar de siembra. Sin embargo, esta prueba-error dio, en muchos casos, resultados positivos, pues logró asentar y posicionar actividades productivas en condiciones satisfactorias. No existían en esas épocas limitantes tan marcadas en el área disponible.

Luego vino, con el avance del desarrollo científico-tecnológico, el empleo de criterios y metodologías modernas, apegadas al rigor científico, con lo cual la experimentación fue rápidamente superada por la investigación; esto aportó nuevos elementos para decidir qué, dónde, cuándo y cómo producir un determinado producto agropecuario. Los resultados de mejoramiento alcanzados son indiscutibles.

Actualmente, se tiene una situación muy diferente, en virtud de que las exigencias del consumidor y consecuentemente de los mercados de destino, es máxima en todos los sentidos, imponiéndose conceptos muy pragmáticos, como son productividad, calidad, asepsia, trazabilidad, rentabilidad, impacto ambiental, sostenibilidad, los cuales pueden resumirse en la práctica comercial en la competitividad que posea el producto y la empresa ante la competencia nacional y externa.

Paradójicamente, esa exigencia productiva, empresarial y comercial se ve, en la actualidad influenciada y determinada en alto grado por el desplazamiento obligado que por razones de crecimiento urbano, industrial y valor de la tierra deben realizar las empresas situadas en zonas aptas para hacer agricultura en forma rentable y competitiva, a lugares en que las condiciones no son siempre las mejores, en razón de sus limitantes para acceder satisfactoriamente y alcanzar esa deseada competitividad; esto se ha dado en llamar *desplazamiento y/o agotamiento de la frontera agrícola*. Esta realidad actual obliga y conduce a la necesaria expansión de la frontera productiva a zonas consideradas, en muchos casos, como marginales.

Esa marginalidad viene expresada y manifestada en muchos casos por la topografía inadecuada, un régimen hídrico inconveniente (mucha o poca lluvia) y la baja fertilidad natural de los terrenos empleados para agricultura, pues, como es bien conocido y de manera particular, las regiones tropicales presentan suelos altamente meteorizados y, por tanto, con bajos contenidos de calcio, magnesio, potasio y silicio, entre otros. Consecuentemente, ello induce y favorece el aumento de la acidez y la presencia de aluminio intercambiable (Al^{3+}) de alta afectación negativa para las plantas. La fragilidad de esas localidades se torna mayor cuando accesoriamamente interviene el factor clima negativamente.

Es válido reconocer y aceptar entonces que las áreas aptas para la producción agrícola competitiva se han venido reduciendo rápidamente en el país, y hoy

debe hacerse uso de la tecnología para superar las limitantes existentes en las zonas de desplazamiento que se tornan como verdaderos retos y desafíos para subsistir y competir satisfactoriamente.

Esta preocupante situación obliga y vuelve imperativa como estrategia productiva y acción compensatoria, que los cultivos que sean introducidos en esas condiciones y pretendan alcanzar niveles elevados de productividad, presenten grados aceptables de adaptabilidad y, que, por otra parte, sean corregidos y nutridos adecuadamente.

En lo que compete a la fertilidad de los suelos, acontece que de acuerdo con nuestra amplia experiencia nacional basada en el resultado del diagnóstico realizado en la materia por las instituciones vinculadas con el agro y la tecnología, como son la academia, centros públicos y privados de investigación y empresas vinculadas al agro, las principales limitantes están asociadas a la acidez del suelo, la insuficiencia, los desequilibrios y la baja disponibilidad de nutrientes esenciales prevaleciente en muchos de ellos. Algunas localidades presentan condiciones limitantes edáficas y climáticas severas.

Existen prácticas tecnológicas que permiten dar respuestas satisfactorias para superar o al menos mitigar esas deficiencias, lo cual implica, sin embargo, un incremento importante de los costos de producción que afecta la rentabilidad final de la empresa. Esto nos introduce en otros problemas asociados directamente al tema de la contaminación ambiental y la salud humana, que son iguales o más preocupantes. Por tanto, resulta imperativo seguir analizando, con la importancia y trascendencia que el asunto merece, esta situación como potencialmente crítica para el éxito de la gestión productiva futura de muchos proyectos y zonas rurales. La simple expansión (horizontal) de la frontera agrícola, en la medida en que no sea acompañada por el avance de la “frontera tecnológica”, implica y significa mantener y aspirar a bajos niveles de productividad. El enfoque de crecimiento horizontal debe ser necesariamente acompañado, orientado y complementado, para ser exitoso, de un activo crecimiento vertical (productividad).

En procura de contribuir con ese objetivo, este artículo aborda de manera simple un tema importante

y relativamente poco tratado, vinculado con las relaciones iónicas prevalecientes en el suelo entre nutrientes esenciales para las plantas.

Capacidad de intercambio iónico del suelo

Los suelos son entes activos que contienen en sus estructuras constituyentes que tienen la propiedad de retener, fijar, intercambiar y adsorber una cantidad máxima de iones positivos (cationes) y negativos (aniones). La capacidad de retención permite y favorece el intercambio total o parcial de la cantidad presente por cantidades equivalentes de otros iones. Los iones retenidos, de acuerdo con su carga, se llamarán catión o anión de intercambio.

La cantidad máxima retenida podrá ser referida al suelo como un todo o específicamente a los constituyentes responsables de provocar el efecto, pudiéndose hablar así de capacidad de intercambio del suelo, o bien, de la capacidad de intercambio de las arcillas o de la materia orgánica que se constituyen en los responsables primarios de la propiedad de intercambio; el tema ha evolucionado, involucrando inclusive la capacidad de intercambio de las raíces de las plantas (CTC radicular). Al número total de cationes de intercambio que pueden ser retenidos por un suelo (la magnitud de sus cargas negativas), se le denomina **capacidad de intercambio catiónico** (CIC). Cuanto mayor sea la CIC, más cationes potencialmente podrá retener e intercambiar un suelo.

El intercambio iónico consiste en un “movimiento” que requiere disponer de un medio para que los iones se puedan mover libremente, el cual puede ser acuoso natural u otra solución apropiada creada artificialmente en el laboratorio. De acuerdo con la naturaleza de la carga de los iones y según la naturaleza de los constituyentes del suelo involucrados, hay cuatro casos de intercambio, a saber: intercambio de cationes e intercambio de aniones, debidos a la fracción arcillosa; intercambio de aniones y cationes, debido a la fracción de materia orgánica presente en el suelo. Los cationes son absorbidos por los coloides arcillosos y orgánicos del suelo a causa de la carga negativa que los rodea. Los cationes de la solución del suelo pueden reemplazar a los cationes adsorbidos en las micelas coloidales. La reacción es reversible y equivalente; es decir, un Mg^{++} reemplaza 2 H^{+} o un K^{+} a un Na^{+} .

Los suelos difieren en sus capacidades de retención, lo cual depende, en un alto grado, de las cantidades y tipos de arcilla y materia orgánica presentes; por ejemplo, un suelo con alto contenido de arcilla está en capacidad potencial de retener más cationes intercambiables, que uno bajo en arcilla. Dicha capacidad se incrementa también al elevarse los contenidos de materia orgánica.

Las características del suelo cambian con la clase y la proporción de los iones intercambiables presentes en el medio; así, por ejemplo, un suelo ácido contiene cantidades apreciables de H^+ y Al^{3+} intercambiables y solubles, mientras que en uno calcáreo predominan las bases (Ca^{++} , Mg^{++} , K^+), cuya saturación es alta.

Interacción de los nutrientes en el suelo

En el suelo se establecen de manera natural y dentro de ciertos límites, relaciones de interacción entre los nutrientes presentes en el medio, lo cual determina, en alto grado, su disponibilidad posterior, pudiendo las raíces regular su absorción e ingreso a la planta. El equilibrio que exista en la solución del suelo influye de manera determinante en la posible absorción y captura de iones; esto, medido en términos de concentración y velocidad.

Las relaciones que se establecen desde la perspectiva de quién los absorbe, pueden ser **sinérgicas** o **antagónicas**, lo que es muy importante para la nutrición de cualquier ser vivo. Una relación sinérgica resulta positiva, en virtud de que los nutrientes vinculados se complementan y potencian para tener un efecto integral de absorción favorable; por el contrario, una relación antagónica resulta, por lo general, inconveniente pues uno o más de los elementos presentes en el medio se verán inhibidos y disminuidos por otro en su acción y capacidad de poder ser absorbidos por las plantas, en la cantidad y tiempo requeridos.

Iones de intercambio

Los iones retenidos en los coloides del suelo pueden ser desplazados de sus posiciones de intercambio y reemplazados por otros, lo que significa que son intercambiables. Lo más común es escuchar sobre

el intercambio catiónico, en el cual elementos fundamentales en la nutrición vegetal, como el calcio, magnesio y potasio, participan activamente en perjuicio o beneficio de la estabilidad vegetal.

Las razones que favorecen el intercambio catiónico, son tres: 1) Uniones tetraédricas y octaédricas rotas que generan cargas insatisfechas, las cuales son balanceadas por los cationes adsorbidos; 2) Sustituciones isomórficas entre elementos como, por ejemplo, aluminio trivalente por silicio cuadrivalente y de iones de valencia menor en la capa octaédrica, lo que genera una carga desbalanceada con igual efecto, y 3) El hidrógeno de los grupos hidroxilos expuestos que puede ser reemplazado por cationes. Está demostrado también el intercambio aniónico en los constituyentes minerales de los suelos.

Los cationes intercambiables están en equilibrio con los cationes disueltos en la solución del suelo (figura 1). En caso de que las raíces de las plantas tomen cationes de la solución, la reacción se mueve hacia la derecha en procura de renovar el suministro, constituyendo por ello una fuente importante de nutrientes para la planta.

Los iones contenidos en la solución del suelo pueden llegar a perderse en el agua de drenaje resultado de la lluvia o el riego, no así los cationes de intercambio, cuya remoción se torna difícil por estar retenidos en la micela; solo la presencia de otros cationes que favorezcan el cambio con los retenidos en las superficies coloidales pueden desplazarlos.

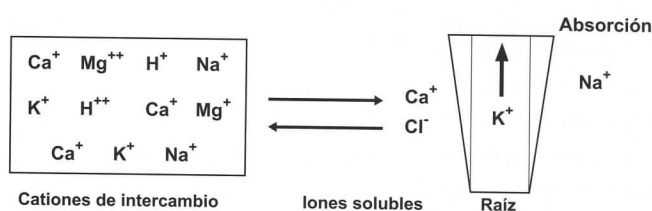


Figura 1. Equilibrio entre cationes intercambiables adsorbidos en la micela y solubles en la solución del suelo.

Cuando se aplican fertilizantes como sales solubles en agua, acontecen cambios inmediatos promovidos por la concentración de los cationes incorporados,

no solo en la solución, sino también en la superficie de los coloides del suelo. La adición de un fertilizante que aporte K^+ y Mg^{2+} induce un aumento de esos cationes intercambiables en el coloide y adicionalmente en la cantidad presente en la solución, como se muestra en la figura 2.

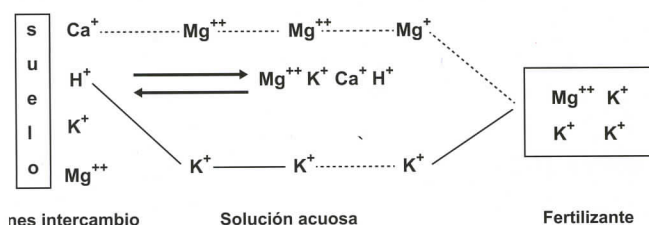


Figura 2. Reacción de intercambio promovida por un fertilizante.

Entre los cationes adsorbidos en el suelo, se distinguen los metálicos como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Mn^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Na^+ , etc., y el catión H^+ . La suma de ellos constituye el valor "S", sinónimo de **suma de cationes metálicos intercambiables**; si a "S" agregamos el valor de H^+ , se tendrá entonces la Capacidad de Intercambio o "T"; posteriormente, se adicionó el Al^{3+} como catión intercambiable que en asocio al H^+ interpretan mejor la acidez del suelo. Entonces, $T = S + H + Al$, lo que permite establecer el **porcentaje de saturación de cationes metálicos** del suelo, como el porcentaje de "S" referido al valor "T". Un suelo está saturado si $S = T$, o sea, no existe $H^+ + Al^{3+}$. Un suelo alto en $H^+ + Al^{3+}$ se caracteriza por su alta acidez; por el contrario, a mayor saturación, corresponde más presencia de cationes metálicos.

La riqueza catiónica de un suelo es fundamental para la nutrición, pues el suelo es el reservorio nutricional de la planta y determinante de la calidad de los productos de uso alimentario y pecuario. Tanto el calcio (Ca) como el magnesio (Mg) se encuentran entre los elementos más comunes existentes en la corteza terrestre, siendo el Ca el que más abunda en condiciones normales, al igual que el potasio (K), difiriendo, notable y significativamente, tanto en contenido como en su disponibilidad para las plantas.

Relaciones catiónicas en el suelo

La CIC se expresa en términos de cmol/L de suelo; con ello es posible conocer la CIC de las arcillas y la materia orgánica como fracciones influyentes, cuyos rangos son variables. Los suelos ácidos muestran limitantes y son, por lo general, deficitarios de Ca y/o Mg, lo cual puede ser resuelto mediante la práctica del encalamiento y la fertilización para corregir su deficiencia, aunque el uso desmedido y excesivo puede ser igualmente perjudicial.

La acidificación constituye un proceso natural causado por la formación de ácidos orgánicos e inorgánicos, como consecuencia de la actividad microbial y debido a la pérdida de bases (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) del suelo por degradación y lixiviación con el exceso de agua de lluvia, y también por el intercambio natural de iones. La captura de cationes por las raíces de las plantas va acompañada de la excreción de ácido (H^+), lo que contribuye igualmente a acidificar el suelo; esto viene determinado por la especie de planta; las leguminosas, por ejemplo, tienen un especial efecto acidificante. La intensidad del proceso de acidificación depende mucho del tipo de suelo y el entorno que lo determina.

Es común encontrar entre los criterios de interpretación para los análisis químicos de suelos, como los expuestos en el presente documento, el uso de relaciones iónicas como uno de los elementos por tomar en cuenta para conocer la condición de fertilidad de una unidad de muestreo, lo que ratifica la importancia de profundizar en relación con el tema. Con el interés e intención de procurar interpretar correctamente lo concerniente a las relaciones que se establecen entre nutrientes —y muy en particular entre las bases del suelo—, resulta en primera instancia necesario tener presente que dicha acción corresponde a un indicador más de valoración que debe necesariamente sumarse e integrarse a otros criterios que, complementaria y adicionalmente, permitan alcanzar una inferencia objetiva y representativa del asunto abordado. Debe quedar muy claro que la interpretación unilateral e independiente de valores resulta inconveniente y poco contributiva al fin pretendido, pues puede conducir al error.

En el cuadro 1 se presentan los niveles críticos generales anotados por Bertsch (1998) según solución extractora, los cuales integran los criterios sugeridos por el MAG y CATIE calibrados en 1973 en invernadero empleando plantas de arroz y maíz como referentes.

Acidez, Ca y Mg extraídos con KCl 1N 1:10
K, P, Mn, Zn, Cu, Fe extraídos con Olsen Modificado 1:10

Adaptado del MAG (1978); Díaz-Romeu y Hunter, CATIE (1978)

Cuadro 1. Niveles críticos para la interpretación de análisis de suelos en Costa Rica.

Características	Categoría		
	Baja	Media	Alta
pH agua 1:2,5	< 5,5	5,6 – 6,5	> 6,5
Acidez (cmol (+)/L)	< 0,5	0,5 – 1,5	> 1,5
Saturación de Acidez (%)	< 10	10 – 50	> 50
Suma de Bases (cmol (+)/L)	< 5	5 – 25	> 25
CICE (cmol (+)/L)	< 5	5 – 25	> 25
Ca (cmol (+)/L)	< 4	4 – 20	> 20
Mg (cmol (+)/L)	< 1	1 – 5	> 5
K (cmol (+)/L)	< 0,2	0,2 – 0,6	> 0,6
P (mg/L)	< 10	10 – 20	> 20
Zn (mg/L)	< 2	2 – 10	> 10
Mn (mg/L)	< 5	5 – 50	> 50
Fe (mg/L)	< 10	10 – 100	> 100
Cu (mg/L)	< 2	2 – 20	> 20
Relación	Desbalance	Balance	Desbalance
Ca/Mg	< 2	2 – 5	> 5
Ca/K	< 5	5 – 25	> 25
Mg/K	< 2,5	2,5 – 15	> 15
Ca+Mg/K	< 10	10 – 40	> 40

Fuente: Bertsch, F. (1998)

En el caso del CATIE, con un criterio más riguroso, se da una variación importante de valores para las mismas relaciones catiónicas propuestas por ese prestigioso centro internacional empleando los mismos extractores químicos, cuyos resultados se exponen en el cuadro 2, lo que revela y ratifica la importancia de contar con criterios apropiados para una correcta interpretación y aplicación al llevarlo a la práctica de la fertilización.

Cuadro 2. Guía para la interpretación de análisis de suelo utilizada por el CATIE.

Relación	Categoría		
	Deficiente	Nivel Crítico	Óptimo
Ca/Mg	0,2	1,2	1,9 - 6,2
Ca/K	--	--	--
Mg/K	0,2	1,6	3,6 - 14
Ca+Mg/K	0,2	3,5	10 - 60

Fuente: Bertsch, F. (1987), Díaz Romeu y Hunter (1978)

Los valores que pueden encontrarse al diagnosticar un suelo de uso agrícola pueden ser en muchos casos excesivos y desequilibrados, como se comprueba al exponer los resultados reportados por Bertsch (1998) y que se resumen en el cuadro 3 siguiente:

Cuadro 3. Relaciones catiónicas de suelos agrícolas costarricenses.

Lugar	Orden Suelo	cmol (+)/l			Relaciones			
		Ca	Mg	K	Ca/Mg	Mg/K	Ca+Mg/K	Ca/K
Liberia, Nacascolo	Typic Pellustert	18,9	7,4	0,11	2,6	67,3	239,1	171,8
Upala, Bijagua	Typic Hapludand	11,3	1,7	0,11	6,6	15,5	118,2	102,7
Pérez Zeledón, Las Mercedes	Orthoxic Haplohumult	1,5	0,3	0,13	5,0	2,3	13,8	11,5

Fuente: Bertsch (1998). pp. 191-121

Resulta cierto, y está suficientemente comprobado, que las relaciones, y no exclusivamente las concentraciones absolutas de las especies iónicas participantes, influyen de manera significativa en la relación suelo-planta; ello se refleja en la absorción, la composición mineral y consecuentemente en la producción de las plantas. Es un hecho demostrado que la tasa de absorción iónica de la planta está directamente influida por la concentración de los nutrimentos presentes en la solución del suelo, demostrando que el balance catiónico no se restringe exclusivamente a los cationes del complejo de intercambio, ni tampoco a los que se

mantienen en equilibrio dinámico con los cationes intercambiables.

Por esas razones, sugieren Chaves, Solera (1988) y Chaves *et al.* (1991), que al evaluar la capacidad potencial de fertilidad de un suelo, resulta fundamental considerar además de las cantidades de cationes intercambiables y su grado de saturación en el complejo de cambio, los tipos de coloides y complementariamente la naturaleza de los iones adsorbidos; también, las relaciones que se establecen entre los iones del suelo. Aseguran, además, que por medio

del estudio del equilibrio iónico, es posible entender mejor el comportamiento químico de un suelo y, con ello, poder adoptar un manejo más adecuado que redundará en una mayor producción.

La adición de cualquier catión en concentraciones elevadas induce efectos interactivos en el complejo de cambio y en la solución del suelo. Se tiene por comprobado que la adición de una alta concentración de K puede reducir la absorción de Ca y Mg por los cultivos; asimismo, al adicionar Ca como calcáreo calcítico en forma continua y sistemática puede resultar en una relación Ca: Mg: K desfavorable y ocasionar desbalances nutricionales al vegetal. Las altas concentraciones de Ca y Mg en los suelos disminuyen la disponibilidad y absorción de K y otros iones, al establecerse una inhibición competitiva entre ellos, generando una condición de desventaja al ion que esté en inferioridad relativa, por lo que la saturación del suelo con Ca y/o Mg limita la absorción de K, tal como acontece particularmente en muchos suelos de la región guanacasteca. De la misma manera, altas cantidades de Ca y K pueden inducir una deficiencia de Mg.

Las plantas tienen requerimientos muy constantes de Ca de manera que cuando este es deficitario, ellas pueden absorber más K y Mg. La asimilación excesiva de Ca puede interferir en la asimilación de otros nutrientes y disminuir la disponibilidad de nutrientes como Fe, Mn y B, principalmente. En general, las plantas poseen, según la especie, requerimientos diferenciales de Ca, Mg y K; en las leguminosas, las necesidades de Ca son mayores (hasta cinco veces) respecto a las gramíneas. En los cultivos productores de azúcar y almidón, las exigencias de Mg parecen ser la mitad de las de Ca. El Mg es un nutriente que presente en pequeñas dosis puede satisfacer las necesidades de muchas plantas, pero que en cantidades excesivas inhibe la absorción de Ca con efecto tóxico.

Es interesante profundizar en este punto sobre la especificidad y variaciones existentes en cuanto a la se-

lectividad de algunas plantas a ciertas bases del suelo, a lo cual Chaves, Solera (1988) cita expresamente:

*A la pregunta de ¿Por qué las gramíneas y entre ellas la caña de azúcar presentan tanta avidez al potasio?, algunos investigadores han contestado y atribuido el motivo a circunstancias radiculares, propiamente relacionadas a la **capacidad de intercambio catiónico (CIC)** de ese sistema.*

Acontece que las raíces poseen naturalmente la propiedad de retener e intercambiar cationes (CIC), lo cual está ligado directamente a la especie vegetal, siendo el potencial superior en el caso de las dicotiledóneas respecto a las monocotiledóneas.

Entre mayor sea la CIC, mayor será también la relación entre cationes divalentes (Ca, Mg) y monovalentes (K, Na, Rb) dentro de la planta, siendo relativamente mayor la absorción de cationes divalentes en virtud de su mayor energía de ligación con la raíz (Malavolta y Crocomo, 1982; Malavolta, 1982).

Las leguminosas poseen por esa razón, una mayor disposición y eficiencia para adsorber K en consideración de su menor CIC. Según Ramos citado por Malavolta y Crocomo (1982), existe una relación inversa entre K absorbido y CIC de las raíces.

Muchos son los estudios que han procurado medir y establecer las relaciones iónicas y muy particularmente las catiónicas óptimas para el crecimiento de las plantas; la relación Ca: Mg ha sido, en ese sentido, de especial interés de los investigadores. Los resultados de la investigación son variables y condicionada a varias circunstancias, como tipo de suelo, contenido de arcilla y materia orgánica, régimen de humedad, nivel de pH, concentración de las especies iónicas presentes, tipo de planta, entre otros factores. Chaves, Solera (1988) realizó en su estudio una amplia revisión de literatura sobre el tema y recabó información relevante, que demuestra la enorme variabilidad de resultados generada por la investigación y la relativa poca consistencia que existe en torno al

tema de las relaciones iónicas y muy en particular las catiónicas. Anota ese autor en lo específico a la relación Ca: Mg, referido no solo a su proporcionalidad, sino también a la participación de los elementos en la CIC del suelo, que Malavolta (1987) recomienda mantenerla en torno a 3:1; Wentworth y Davison (1987) señalan, por su parte, altas producciones con relaciones 6:1 o cuando la participación del Mg en la CTC es menor al 6%.

Bertsch (1988) expone que *El equilibrio entre metales alcalino y alcalinotérreos en un suelo que fue sometido a agotamiento en el laboratorio, tendió a retornar a sus valores originales, lo que indica que los equilibrios K-Ca-Mg son en gran medida una propiedad inherente del suelo ligada a la meteorización del material parental* (Carvajal, 1985).

En la caña de azúcar hay relativamente pocos estudios específicos sobre la relación Ca: Mg ideal, concluyendo Peixoto (1980) citado por Chaves (1988), que relaciones en el suelo superiores a 5,5:1 pueden inducir deficiencias de Mg y otros nutrientes, limitando la producción; ese investigador brasileño encontró, a su vez, que al aumentar el contenido de K en el suelo, la absorción de Ca por la planta se reducía, manifestando su deficiencia. Asimismo, altas dosis de Mg tendían a incrementar las producciones, en el tanto se contara con altos niveles de K, el cual redujo el efecto tóxico del Mg en el suelo. Pimentel (1986) sugiere que una relación de 3:1 puede ser inconveniente para la caña, asegurando que una cercana a 5:1 resulta mejor pues favorece el equilibrio nutricional, como también lo consideraran Peixoto (1980) y Vianna (1983).

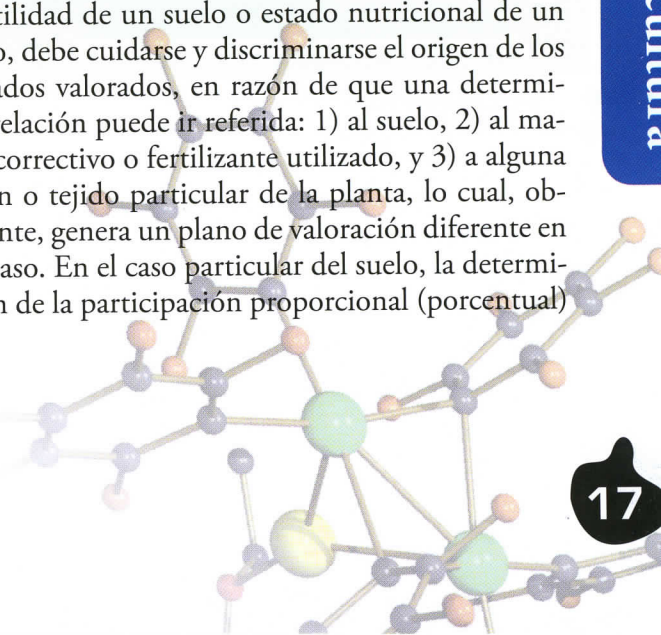
En su estudio donde valoró siete relaciones Ca: Mg (1:1; 2,5:1; 4:1; 5,5:1; 7:1; 10:1 y 16:1), empleando como fuentes carbonatos y sulfatos de Ca y Mg, Chaves, Solera (1988) y Chaves *et al.* (1991) determinaron que los carbonatos propiciaron la mayor producción de tallos y hojas; mientras que los sulfatos, por su parte, promovieron la generación de hijos y raíces. Las relaciones Ca: Mg de 4,86:1 en los tra-

tamientos con carbonatos y de 10,34:1, con sulfatos, propiciaron las máximas producciones de materia seca total de caña.

Es definitivo que la influencia negativa de una relación Ca: Mg estrecha en la producción puede ser atribuida a las altas cantidades de Mg presentes, que favorecen la mayor competición entre el Ca y el K. La literatura reporta una fuerte correlación entre las relaciones Ca: Mg del suelo con la verificada en los tejidos de la planta.

Manifiestan Chaves, Solera (1988) y Chaves *et al.* (1991) que la mayoría de estudios sobre relaciones Ca: Mg concuerdan en señalar que la aplicación de esos nutrimentos modifica los contenidos de Ca y Mg tanto en el suelo como en la planta, independientemente de la producción obtenida y cultivo estudiado, estableciendo, además, un efecto antagónico y competitivo con respecto a K y las relaciones iónicas existentes entre Ca: Mg: K y otros iones. Aseguran, asimismo, que la respuesta de las plantas a la relación Ca: Mg es altamente variable, manteniendo algunas de ellas poca sensibilidad y buena adaptación a una amplia faja de variación, como es el caso de la soya y el eucalipto; otros cultivos requieren relaciones específicas, en consideración de su elevada sensibilidad, como acontece con el tomate, el ajo y la caña de azúcar.

Sobre el tema abordado, se puede concluir luego de su desarrollo, pues lo expuesto anteriormente así lo demuestra, que al pretender utilizar las relaciones iónicas como criterio interpretativo y de diagnóstico de fertilidad de un suelo o estado nutricional de un cultivo, debe cuidarse y discriminarse el origen de los resultados valorados, en razón de que una determinada relación puede ir referida: 1) al suelo, 2) al material correctivo o fertilizante utilizado, y 3) a alguna sección o tejido particular de la planta, lo cual, obviamente, genera un plano de valoración diferente en cada caso. En el caso particular del suelo, la determinación de la participación proporcional (porcentual)



de los cationes en la CIC resulta ser un criterio también empleado como instrumento de diagnóstico.

La interpretación a nivel foliar de una determinada relación catiónica puede resultar más difícil de realizar en consideración de que la concentración mineral presente en los tejidos diagnóstico de la planta, depende y está directamente vinculada a lo que acontezca en los procesos de absorción, transporte y acumulación, donde pueden acontecer interacciones sinérgicas y antagónicas de diversa naturaleza que hacen más difícil la interpretación.

Asimismo, cualquier interpretación de relaciones iónicas debe valorar no solo la resultante absoluta de esta, sino, muy especial y particularmente, la situación de las especies iónicas que originalmente la determinan, pues, caso contrario, puede incurrirse en un craso error; por ejemplo, si se tiene por cierto y

demostrado que la mejor relación Ca: Mg en el suelo para lograr la máxima producción es de 3:1 y no se valoran e interpretan las concentraciones individuales de Ca y Mg, podría darse una interpretación falsa y equivocada. El cuadro 4 presenta el resultado de un ejercicio teórico pero posible de encontrar en la realidad, por medio del cual se logra obtener la relación idónea de 3:1 partiendo de concentraciones individuales de Ca y Mg diferentes en el suelo, lo cual demuestra que siempre es elemental valorar e integrar ese criterio al realizar cualquier interpretación; otros ejemplos similares se anotan en el cuadro 3, donde la insuficiencia de K desequilibra las relaciones catiónicas. En el ejercicio propuesto se parte sea de concentraciones calificadas según criterio aportado por Bertsch (1998) como alto, bajo y medio, lo que hace que en los casos extremos la relación pierda validez técnica, en virtud de su inconsistencia debido al exceso o insuficiencia de esos nutrientes en el suelo.

Cuadro 4. Obtención de una misma relación catiónica partiendo de concentraciones diferentes de las especies químicas participantes.

Relación	Contenido (cmol (+)/L)		Relación
	Ca	Mg	
Ca: Mg	21	7	3:1
	15	5	3:1
	12	4	3:1
	9	3	3:1
	3	1	3:1
	0,9	0,3	3:1
	0,3	0,1	3:1

Otras relaciones nutricionales

Los micronutrientes son vitales para la estabilidad nutricional de los seres vivos, para lo cual los suelos, como proveedores, y los vegetales, como alimento humano y pecuario, son fundamentales, en consideración de las bajas concentraciones que se requieren para satisfacer las necesidades. No todos son esenciales para las plantas, pero sí algunos de ellos determinantes para los animales, tal como acontece con el selenio, cuyas altas cantidades naturales en el suelo (por ejemplo, en Estados Unidos) pueden resultar venenosas al ser pastadas.

Se sospecha que algunos problemas de índole sanitaria en animales, por ejemplo, abortos, pueden tener su origen en desequilibrios de micronutrientes esenciales. Hay que tener presente que al final de cuentas la disponibilidad y utilización de los macro y micronutrientes en el hombre y los animales, dependen de su contenido real y relativo en el pienso. El contenido de elementos esenciales para la nutrición del ganado bovino (Araya, Villalobos, 2010) presentes en los pastos, como son el calcio (Ca), fósforo (P), potasio (K), magnesio (Mg), sodio (Na), cloro (Cl), cobre (Cu), cobalto (Co), yodo (I), hierro (Fe), manganeso (Mn), selenio (Se), zinc (Zn) y molibdeno (Mo), pueden verse afectados por diversas razones, naturales e inducidas, como son: especie forrajera, su grado de maduración, el rendimiento, el manejo de la pastura, el contenido mineral del suelo, entre otras, y ser limitantes para la estabilidad de los animales y su capacidad productiva, como ha sido comprobado en estudios realizados en Costa Rica. Por este motivo, la adición de minerales es una práctica recomendada y muy utilizada en el manejo del ganado bovino.

Los pastos pueden ser deficitarios en Mg si se aplica demasiado amonio (NH_4^+) o K^+ y si complementariamente se dispone de poco Mg^{2+} , lo que afecta significativamente la calidad de la pastura. Por su parte, la disponibilidad de algunos minerales (fósforo, zinc, etc.) depende en cierta medida del contenido de Ca en la dieta.

Una alta concentración de sulfato (SO_4) reduce la captura y absorción del molibdeno (Mo). Otras relaciones iónicas interesantes pueden evaluarse a nivel foliar, como es el caso de las siguientes: N/K, N/S, P/S y 100 K/Bases en el suelo, tal como lo evaluarán Chaves, Solera (1988) y Chaves *et al.* (1991) en su estudio.

Conclusión

El empleo de las relaciones iónicas como criterio analítico válido para procurar interpretar la fertilidad de un suelo o conocer las necesidades nutricionales de un cultivo, puede resultar importante y revelador; sin embargo, es fundamental tener presente que dicho criterio es apenas un respaldo, uno más de muchos otros indicadores que deben integrarse para tener los mejores elementos de diagnóstico e interpretación que favorezcan llegar a adoptar inferencias y conclusiones certeras y representativas. Al referirse a relaciones iónicas y en particular a las catiónicas, hay que tener claro y discernir que estas pueden ir referidas a tres elementos: 1) el suelo; 2) al material correctivo o fertilizante empleado, y 3) a alguna sección o tejido especial de la planta (foliar, raíz), no existiendo por ello un único referente válido al emitir criterio, lo cual, si no se conoce, puede inducir a un grave error al pretender interpretar correctamente los resultados químicos. La relación iónica absoluta poco nos revela si complementariamente no se interpreta la condición individual y particular de las especies químicas involucradas que conforman y la determinan, en cuanto a cantidad y disponibilidad. De la misma forma, resulta cierto que las relaciones iónicas se mueven alrededor de un rango de valores y no exclusivamente sobre un único valor puntual. El diagnóstico e interpretación nutricional de un suelo o un cultivo es un asunto de relacionar, integrar y articular los factores y elementos individuales que nos visualicen un entorno completo y no apenas una parte de este. No aceptar la importancia y validez de las relaciones iónicas, es no creer en el principio inobjetable de los balances y los equilibrios nutricionales que acontecen tanto en el suelo como en los seres vivos, pese a lo cual debe reiterarse y tenerse presente que el empleo de las relaciones iónicas como criterio para fundamentar y operar un programa nutricional y dosificar la adición de fertilizantes, es limitado y no ofrece ninguna garantía de éxito. Resulta imperativo y necesario investigar y profundizar más en el estudio y validación de resultados sobre la vinculación y correlación existente entre las relaciones iónicas determinadas en el suelo, la planta y su impacto sobre la producción agrícola y la calidad de los productos finales, tanto alimentarios como para uso pecuario, como son las pasturas por ejemplo.

Referencias bibliográficas

ARAYA VILLALOBOS, J. L. 2010. Los minerales en la alimentación del ganado bovino. Puntarenas, C.R.: MAG, Dirección Regional Pacífico Central. 28 pp.

BERTSCH, F. 1987. Manual para Interpretar la Fertilidad de los Suelos de Costa Rica. 2.^a ed. San José, Costa Rica: Oficina de Publicaciones de la UCR. 81 pp.

BERTSCH, F. 1988. Potasio, calcio y magnesio en el sistema suelo-café. En: Curso Regional sobre Nutrición Mineral del Café. San José, Costa Rica. Programa Cooperativo para la Protección y Modernización de la Caficultura (PROMECAFE), noviembre, pp. 83-98.

BERTSCH, F. 1998. La fertilidad de los suelos y su manejo. 1.^a ed. San José, Costa Rica: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS) 157 pp.

CARVAJAL, J.F. 1984. Cafeto. Cultivo y fertilización. 2.^a ed. Bern, Suiza, Instituto Internacional de la Potasa. 254 pp.

CHAVES SOLERA, M.A. 1988. Efeito de relações Ca:Mg, utilizando carbonatos e sulfatos, sobre o crescimento e a nutrição mineral da cana-de-açúcar. Tesis Magister Scientiae. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brasil. 186 pp.

CHAVES SOLERA, M. 1999. El nitrógeno, fósforo y potasio en la caña de azúcar. San José, Costa Rica. LAICA-DIECA, setiembre. 130 pp. Disponible en: <http://www.laica.co.cr/biblioteca/dieca/nutricionyfertilizacion>

CHAVES S., M.A.; RIBEIRO, A.C.; ALVAREZ, V.H.; DE FELIPO, B.V.; NOVAIS DE, R.F. 1989a. Efecto de relaciones Ca:Mg, utilizando carbonatos y sulfatos, sobre el crecimiento y la nutrición mineral de la caña de azúcar. I. Efectos electroquímicos en el suelo. En: Congreso Agronómico Nacional,

8, Cartago, Costa Rica, 1989. Resúmenes. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, julio. Vol 1, pp. 117-118.

CHAVES S., M.A.; RIBEIRO, A.C.; ALVAREZ, V.H.; DE FELIPO, B.V.; NOVAIS DE, R.F. 1989b. Efecto de relaciones Ca:Mg, utilizando carbonatos y sulfatos, sobre el crecimiento y la nutrición mineral de la caña de azúcar. II. Producción de materia seca. En: Congreso Agronómico Nacional, 8, Cartago, Costa Rica, 1989. Resúmenes. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, julio. Vol 1, pp. 119-120.

CHAVES S., M.A.; RIBEIRO, A.C.; ALVAREZ, V.H.; DE FELIPO, B.V.; NOVAIS DE, R.F. 1989c. Efecto de relaciones Ca:Mg, utilizando carbonatos y sulfatos, sobre el crecimiento y la nutrición mineral de la caña de azúcar. III. Extracción y concentración fraccional de nutrimentos en los tejidos. En: Congreso Agronómico Nacional, 8, Cartago, Costa Rica, 1989. Resúmenes. San José, Colegio de Ingenieros Agrónomos, julio. Vol 1, pp. 121-123.

CHAVES SOLERA, M.A.; RIBEIRO, A.C.; ALVAREZ V., V.H.; DE FELIPO, B.V.; NOVAIS DE, R.F. 1991. Efecto de relaciones Ca:Mg, utilizando carbonatos y sulfatos, sobre el crecimiento y la nutrición mineral de la caña de azúcar. En: Congreso Tecnológico de la Caña de Azúcar, 3, San José, Costa Rica, 1989. Memorias. San José, LAICA-DIECA, pp. 159-200.

VALENCIA A., G. 1988. Nutrición mineral del cafeto. En: Curso Regional sobre Nutrición Mineral del Café. San José, Costa Rica. Programa Cooperativo para la Protección y Modernización de la Caficultura (PROMECAFE), noviembre, pp. 159-176.