

Disponibilidad y relación de calcio y magnesio. Efecto sobre exportación y concentración en raigrás y soja

Ferro D.A.^{1,4}; L.A. Lozano^{1,3,*}; C.G. Bartoli^{2,3}; D.D. Fanello²; L. Larrieu¹; G.J. Millan¹; C.G. Soracco^{1,3}

¹ Centro de Investigación para la Sustentabilidad de Suelos Agrícolas y Forestales (CISSAF). Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP. Av 60 y 119 s/n, CC 31, CP 1900. La Plata, Buenos Aires, Argentina;

² INFIVE, Facultades de Ciencias Agrarias y Forestales y de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata- CCT -CONICET La Plata, CC 327, 113 n° 495 esq. 61. La Plata, Buenos Aires, Argentina; ³ Investigador del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET);

⁴ Becario de posgrado de la Universidad Nacional de La Plata; *: luislozanoarg@gmail.com

Ferro D.A.; L.A. Lozano; C.G. Bartoli; D.D. Fanello; L. Larrieu; G.J. Millan; C.G. Soracco (2020). Disponibilidad y relación de calcio y magnesio. Efecto sobre exportación y concentración en raigrás y soja. Rev. Fac. Agron. Vol 119 (2): 1-10. <https://doi.org/10.24215/16699513e057>

El Ca y el Mg intervienen en el crecimiento vegetal según su disponibilidad, y posiblemente su relación. Los suelos de la Región Pampeana se han considerado bien dotados de estos elementos, aunque diagnosticaron áreas con bajos contenidos. El objetivo del trabajo fue evaluar diferentes concentraciones de Ca en solución nutritiva sobre la producción de materia seca (MS), contenido de Ca y Mg en MS, y su exportación aérea en raigrás anual (*Lolium multiflorum* L.) y soja forrajera (*Glycine max* [L.] Merr). Adicionalmente, se evaluó el efecto de duplicar la concentración a igual relación Ca/Mg. Se realizó un ensayo con soluciones nutritivas de 1, 5, 9 y 12 mM Ca y 2 mM Mg. Se adicionó un tratamiento con 10 mM Ca y 4 mM Mg. Se realizaron tres cortes en raigrás y uno en soja. Se determinó que en raigrás los niveles de nutrición cálcica influyen sobre las concentraciones y exportación de Ca y Mg en MS, sin efectos sobre la producción de MS. La relación Ca/Mg ocasionalmente se relacionó con la concentración de Ca y Mg en MS y en la exportación de Ca y Mg. En soja, los niveles de nutrición cálcica influyen sobre la producción de MS, concentraciones de Ca en MS y en la exportación de Ca y Mg, mientras que no intervienen en la concentración de Mg en MS. En este cultivo, la relación Ca/Mg en solución ocasionalmente produjo efecto en la concentración de Ca en MS y en la exportación de Ca y Mg.

Palabras clave: nutrición; balance; concentración; crecimiento; calidad

Ferro D.A.; L.A. Lozano; C.G. Bartoli; D.D. Fanello; L. Larrieu; G.J. Millan; C.G. Soracco (2020). Calcium and Magnesium availability and ratio. Effect on exports and concentration in ryegrass and soybean. Rev. Fac. Agron. Vol 119 (2): 1-10. <https://doi.org/10.24215/16699513e057>

Ca and Mg are involved in plant growth according to their availability, and possibly their relationship. The soils of the Pampean Region have been considered well endowed with these elements, although they diagnosed areas with low contents. The objective of this work was to evaluate different concentrations of Ca in nutrient solution on the production of dry matter (DM), Ca and Mg content in DM, and its annual export in annual ryegrass (*Lolium multiflorum* L.) and forage soybean (*Glycine max* [L.] Merr). Additionally, the effect of doubling the concentration at the same Ca/Mg ratio was evaluated. A test was carried out with nutrient solutions of 1, 5, 9 and 12 mM Ca and 2 mM Mg. A treatment with 10 mM Ca and 4 mM Mg was added. Three cuts were made in ryegrass and one in soybeans. In ryegrass, it was determined that the levels of calcium nutrition influence the concentrations and export of Ca and Mg in MS, without effects on the production of DM. The Ca/Mg ratio was occasionally related to the concentration of Ca and Mg in MS and in the export of Ca and Mg. In soybean, calcium nutrition levels influence the production of DM, concentrations of Ca in DM and the export of Ca and Mg, while they do not intervene in the concentration of Mg in DM. The Ca/Mg ratio in solution occasionally had an effect on the concentration of Ca in MS and on the export of Ca and Mg.

Key words: nutrition; balance; concentration; growth; quality

<https://revistas.unlp.edu.ar/revagro>

Recibido: 27/09/2019

Aceptado: 15/11/2019

Disponible on line: 07/12/2020

ISSN 0041-8676 - ISSN (on line) 1669-9513, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, Argentina.



INTRODUCCIÓN

El calcio (Ca) y el magnesio (Mg) son nutrientes que los cultivos necesitan en la materia seca (MS) en un rango de cantidad absoluta y, posiblemente en relación con otros elementos, para completar su ciclo de vida sin limitaciones (Marschner, 2012).

Los suelos de la Región Pampeana han sido considerados tradicionalmente bien dotados de Ca y Mg, sin embargo, algunos autores diagnosticaron áreas susceptibles a la disminución de bases en suelo (Presutti, 2018). Más aún, se han reportado zonas con bajas concentraciones de Ca y Mg intercambiables (Sainz Rozas et al., 2013; Presutti et al., 2016), asociados, fundamentalmente, a extracciones por actividades agropecuarias (Presutti, 2016; Abbona et al., 2018; García & Presutti, 2018). Además, algunos autores han observado respuestas al agregado de fertilizantes cálcicos y/o magnésicos en cultivos de soja (Vivas & Fontanetto, 2003; Gambaudo et al., 2007; Martínez & Cordone, 2008; Barbieri et al., 2015), alfalfa (Melgar et al., 1999), maíz (Vivas et al., 2001) y trigo (González et al., 2001), demostrando la existencia de limitaciones de crecimiento relacionadas a la disponibilidad de estos elementos en suelo y, posiblemente, a la relación entre sus concentraciones. Sin embargo, otros autores no encontraron respuesta en rendimiento de soja (*Glycine max* L. Merr.) ante el agregado de fertilizantes cálcico-magnésicos en un suelo Hapludol típico de Villegas, provincia de Buenos Aires (Girón et al., 2016).

Existe una relación directa entre el crecimiento de un cultivo y la disponibilidad de nutrientes solubles, es decir, disponibles para ser absorbidos por las raíces de las plantas. Rayar (1981, citado en Bruns, 2016) reportó que a partir de concentraciones de 0,25 mM de Ca se producen los máximos crecimientos de soja, pudiéndose encontrar disminuciones de hasta el 66%, según De Almeida et al. (2017), debido a su baja disponibilidad. Wolt & Adams (1979) encontraron aumentos de MS superficial de maní (*Arachis hypogaea* L.) con concentraciones hasta 0,15 mM Ca en la solución nutritiva, aunque Zharare et al. (2009) encontraron diferentes concentraciones óptimas de Ca para diferentes variedades de este cultivo, utilizando soluciones nutritivas entre 0,009 y 2,5 mM Ca. Genc et al. (2010) observaron respuesta del crecimiento de MS en trigo (*Triticum aestivum* L.) hasta concentraciones de 0,5-1 mM Ca en solución, mientras que Singh et al. (2014) encontraron que la producción de MS de raíces de mijo africano (*Eleusine coracana* L.) se incrementó hasta 5 mM de Ca, habiendo una disminución de las concentraciones superficiales de estos elementos en 10 y 20 mM de Ca en la solución nutritiva.

Los cultivos contienen alrededor de 0,1-5 % de Ca y 0,15-0,35 % de Mg en la materia seca vegetativa en su óptimo crecimiento, siendo mayor en especies dicotiledóneas que en monocotiledóneas (Loneragan & Snowball, 1969; Guo et al., 2016), evidenciando los mayores requerimientos de las primeras (White & Broadley 2003, en Marschner 2012; García & Correndo, 2016). Se asume que la concentración de Ca en hoja se encuentra controlada mayormente por la genética del cultivo y en menor medida por la concentración de Ca en el medio radical, siempre y cuando la provisión de Ca

sea adecuada para el crecimiento de las plantas (Loneragan & Snowball, 1969).

Sin embargo, algunos autores han encontrado cambios en la concentración foliar de estos nutrientes según su disponibilidad en la solución nutritiva. Alva et al. (1991) encontraron aumentos en la concentración foliar de Ca en soja desde 0,5 a 2,5 mM Ca mientras que Wolt & Adams (1979) encontraron que la concentración foliar de Ca se incrementó de 0,16 a 2,68 % en maní en concentraciones de 0,25 a 0,5 mM Ca en solución de cultivo. Zharare et al. (2009) encontraron diferentes respuestas de concentración de Ca en hoja en función de su concentración en solución nutritiva para diferentes variedades de maní. Rayar (1981, citado en Bruns 2016) reportó que con concentraciones de Ca a partir de 0,25 mM en solución, las concentraciones foliares de Mg, potasio (K) y fósforo (P) disminuyeron en soja. En el caso de las gramíneas, Genc et al. (2010) encontraron incremento en la concentración de Ca hasta 2 mM Ca en trigo; y Singh et al. (2014), encontraron que la concentración foliar de Ca aumentó en hojas de mijo desde 0,1 a 20 mM de Ca en valores de 0,1% a 5%, respectivamente.

Vázquez & Pagani (2014) encontraron que los valores relativos de las concentraciones de estos elementos en la solución interna del suelo, relación Ca/Mg, recomendados para el normal desarrollo de cultivos se encontraban entre 3 y 15, según las condiciones experimentales de los distintos casos analizados (suelo, clima, cultivo, material genético). Los autores evidenciaron una elevada amplitud del rango y la necesidad de definir los sistemas diagnosticados para los cuales esos rangos son válidos. Los autores también destacan que otras experiencias parecerían señalar que la nutrición vegetal con estos elementos obedece a valores absolutos de los mismos, sin atribuirle importancia alguna a las cantidades relativas. Otros autores, realizando una amplia revisión bibliográfica, encontraron que las relaciones entre las bases del suelo no permiten hacer un diagnóstico de la fertilidad de los mismos (Kopittke & Menzies, 2007; Chaganti & Culman, 2017). Kopittke & Menzies (2007), además, mencionan que hay poca investigación publicada que corrobore la importancia de un suelo equilibrado para maximizar rendimientos y calidad de cultivos.

Sin embargo, se ha reportado que concentraciones elevadas de Ca disminuyen el consumo de Mg y su concentración en hojas (Zharare et al., 2009; Prasad, 2010; Jezek et al., 2015, citado en Sun et al. 2018; Bruns, 2016), mientras que concentraciones elevadas de Mg pueden provocar disminución en el contenido foliar de Ca (Gransee & Fühns, 2013, citado en Pourranjbari Saghaiesh et al., 2018). Además, se ha reportado que la ausencia de Mg en solución incrementa el consumo de Ca, probablemente por medio de absorción pasiva mediante canales moleculares de transporte (Pourranjbari Saghaiesh et al., 2018), mientras que bajas concentraciones de Ca en solución incrementa el consumo de Mg, aumentando la actividad de los transportadores (Hermans et al., 2010a, 2010b, citado en Guo et al., 2016). Por tales motivos, el consumo de Ca y Mg por las raíces, y su movimiento en planta, no sería independiente de su concentración relativa (Prasad, 2010).

La producción de materia seca y la concentración en planta de Ca y Mg, en consecuencia, impactarán sobre la exportación de estos elementos desde el suelo, con su posterior pérdida si no son agregados mediante fertilizantes. Esta situación es agravada actualmente por el hecho de que estos elementos no son repuestos rutinariamente en los planteos productivos. El reducido consumo de fertilizantes con elementos básicos en su composición (CIAFA, 2018) y la baja concentración determinada en laboratorios de suelos de la región evidencian esta problemática, resultando en una escasa información disponible que sustente, con bases sólidas, su importancia en la producción de cultivos y la dinámica de estos elementos en el agroecosistema (Ciarlo et al., 2018). La cuantificación del efecto de distintas disponibilidades de Ca y Mg en solución nutritiva sobre el rendimiento de MS, su concentración en MS y exportación aérea por MS en soja forrajera (*Glycine max* L. Merr) y raigrás anual (*Lolium multiflorum* L.) puede aportar información valiosa en ese sentido.

La hipótesis de este trabajo es que los niveles de nutrición cálcica influyen sobre la producción de MS, concentración en MS y exportación de Ca y Mg, independientemente de la relación Ca/Mg, en raigrás anual y soja forrajera. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de diferentes concentraciones de Ca en solución nutritiva sobre la producción de materia seca, contenido de Ca y Mg en MS, y exportación de dichos nutrientes en raigrás anual y soja forrajera. A su vez, se evaluó el efecto de la duplicación del Ca y Mg, manteniendo la relación de referencia entre estos nutrientes, para determinar si la exportación se ve afectada por la relación o por la concentración de Ca.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó un ensayo en soja forrajera de grado VIII (*Glycine max* L. Merr) y raigrás anual (*Lolium multiflorum* L.) en ambiente protegido (invernáculo). Se colocaron semillas de los cultivos en speedlings con sustrato inerte (vermiculita) para su germinación. Las plantas de soja al alcanzar el desarrollo de la primera hoja trifoliolada, fueron trasplantadas individualmente a recipientes de 1 L con solución nutritiva y posteriormente se colocaron tres plantas por cada recipiente de 20 L que conformaron la unidad experimental. En raigrás se utilizaron recipientes de 1 L de capacidad con tres plantas cada uno como unidad experimental. En todos los casos se seleccionaron para el trasplante plántulas homogéneas y sanas. Para la oxigenación de la solución se utilizaron aireadores comerciales. Se utilizó un diseño experimental completamente aleatorizado (DCA) en ambos casos, con tres repeticiones en soja y cuatro en raigrás.

Se utilizaron sales analíticas para lograr la solución nutritiva de formulación básica general de Legget & Frere (1971), modificada por Fanello (2016). La solución utilizada se seleccionó por su formulación óptima para la mayoría de las plantas (Hoagland & Arnon, 1950) usadas actualmente en forma rutinaria en los estudios de biología vegetal (Miravé et al., 2014).

Los tratamientos consistieron en la modificación de las distintas concentraciones de Ca, manteniendo la

concentración de Mg constante y por lo tanto variando la relación Ca/Mg, excepto en un tratamiento, donde se duplicaron ambas concentraciones, manteniendo la relación Ca/Mg de referencia con valor de 2,5 (TD). Los tratamientos fueron:

- T1: 1 mM $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$; 2 mM MgSO_4 ; 11 mM NH_4NO_3 (relación Ca/Mg: 0,5)

- T5: 5 mM $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$; 2 mM MgSO_4 ; 7 mM NH_4NO_3 (relación Ca/Mg: 2,5)

- T9: 9 mM $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$; 2 mM MgSO_4 ; 3 mM NH_4NO_3 (relación Ca/Mg: 4,5)

- T12: 12 mM $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$; 2 mM MgSO_4 (relación Ca/Mg: 6)

- TD: 10 mM $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$; 4 mM MgSO_4 ; 2 mM NH_4NO_3 (relación Ca/Mg: 2,5)

Las sales y concentraciones del resto de los nutrientes fueron los siguientes para todos los casos: 2,5 mM KNO_3 , 1 mM KH_2PO_4 , 20 μM FeNaEDTA , 5 μM H_3BO_3 , 0,9 μM MnCl_2 , 0,8 μM ZnCl_2 , 0,3 μM CuSO_4 y 0,01 μM Na_2MoO_4 . Los tratamientos se realizaron variando la concentración de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ y se corrigieron las diferencias de concentración de N entre tratamientos utilizando una solución de nitrato de amonio (NH_4NO_3) 0,05 M de pH alrededor de 5,3. El pH de las soluciones nutritivas se midió periódicamente y se mantuvo en el rango de 5,0 - 6,5. El cambio total de la solución se realizó cada 20 días en soja y luego de cada corte en raigrás, cada 20-25 días. El volumen de la solución fue repuesto periódicamente con agua destilada para evitar desbalances en la proporción de nutrientes. En el caso de la soja, las plantas fueron sostenidas en la tapa de cada recipiente con goma espuma y se le colocaron tutores utilizando hilos sostenidos desde el techo del invernáculo.

Se realizó un corte en soja a los 100 días después de la siembra y tres cortes en raigrás, cada 20-25 días. Se evaluó de cada uno la producción de materia seca (MS) secada en estufa a 60°C con circulación forzada de aire hasta peso constante. Además, se calculó la materia seca aérea total en raigrás realizando la sumatoria de los cortes. Se midió la concentración de Ca y Mg en la MS mediante digestión ácida y posterior titulación con EDTA (Kalra, 1998). Finalmente, se calculó la exportación de Ca y Mg realizando el producto ambas variables mencionadas anteriormente.

Los resultados fueron evaluados estadísticamente por medio de análisis paramétrico de la varianza, previa comprobación de supuestos básicos, entre los tratamientos que varían la concentración de Ca y relación Ca/Mg (T1 a T12) y se realizó una comparación de medias (t-Student) entre aquellos que poseen la misma relación Ca/Mg y diferentes concentraciones de ambos (T5 y TD). Posteriormente se realizó una comparación múltiple de Tukey entre los tratamientos que evidenciaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$). Se utilizó el software Infostat (Di Rienzo et al., 2015).

RESULTADOS

Efecto en la producción de MS

La producción de MS de raigrás y soja respecto a los cortes y los tratamientos con diferente concentración de Ca y relación Ca/Mg se puede observar en la Figura 1A. En raigrás no se observaron diferencias en la producción de MS entre tratamientos para ninguno de los cortes ni en la sumatoria de ellos. En la totalidad de los cortes se produjeron crecimientos de alrededor de 10 g en cada maceta. En soja se pudo observar que el tratamiento con menor concentración de Ca produjo menores rendimientos en MS aérea vegetativa, con una reducción aproximada del 50% (15 g vs 30 g, aproximadamente). El crecimiento de raigrás y soja respecto a los cortes y los tratamientos con diferente concentración de Ca y Mg e igual relación Ca/Mg (T5 y TD) se puede observar en la Figura 1B. No se observaron diferencias en el crecimiento entre tratamientos para ninguno de los cultivos entre cortes o sumatoria de ellos. Al igual que los tratamientos con diferente relación, en cada corte de raigrás se produjeron alrededor de 10 g

por maceta, mientras que en soja el tratamiento con mayor concentración de los nutrientes produjo valores mayores a 30 g, sin llegar a ser diferencias significativas.

Efecto en la concentración de Ca en MS

La concentración de Ca en MS de raigrás y soja respecto a los cortes y los tratamientos con diferente concentración de Ca y relación Ca/Mg se puede observar en la Figura 2A. En raigrás se observó que la concentración de Ca en MS aumentó a medida que se incrementó la concentración de Ca en solución, sugiriendo un incremento también entre cortes del cultivo, alcanzando concentraciones desde 0,25% hasta 2% de Ca, superando los valores máximos encontrados en soja en estos tratamientos. En el primer corte la concentración de Ca en MS aumentó a medida que incrementaba la concentración de Ca en solución, mientras que en el corte dos y tres los tratamientos T9 y T12 no se diferenciaron entre sí, alcanzando las máximas concentraciones.

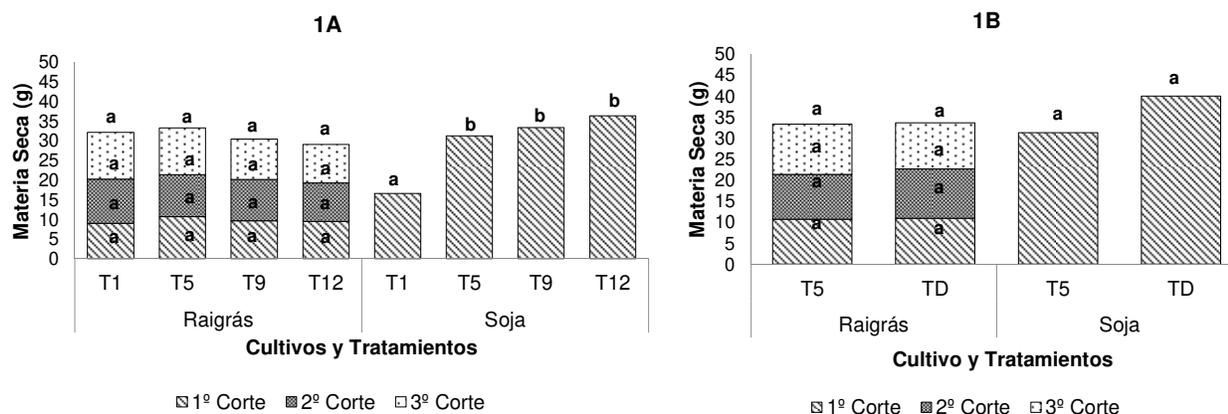


Figura 1. Producción de MS expresada en g maceta⁻¹ diferenciada por cultivos, cortes y sumatoria de cortes en raigrás. A: tratamientos con diferente concentración de Ca y relación Ca/Mg (T1 a T12); B: tratamientos con diferente concentración de Ca y Mg e igual relación Ca/Mg (T5 y TD). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos para el mismo corte o sumatoria de cortes en el mismo cultivo (p<0,05).

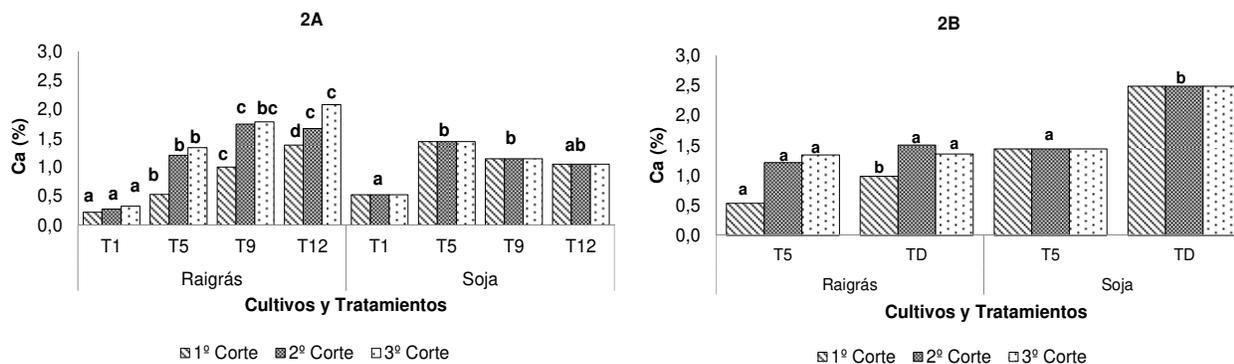


Figura 2. Concentración de Ca en MS vegetativa expresado en % m/m diferenciada por cultivos y cortes. A: tratamientos con diferente concentración de Ca y relación Ca/Mg (T1 a T12); B: tratamientos con diferente concentración de Ca y Mg e igual relación Ca/Mg (T5 y TD). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos para el mismo corte en el mismo cultivo (p<0,05).

Las concentraciones de Ca en MS de raigrás y soja respecto a los distintos cortes y los tratamientos con diferente concentración de Ca y Mg e igual relación Ca/Mg (T5 y TD) son mostradas en la Figura 2B. Para el caso del raigrás, el tratamiento con mayor concentración de Ca y Mg evidenció una mayor concentración vegetal solamente en el primer corte, incrementándose desde 0,5% a 1% aproximadamente. Los restantes cortes produjeron mayores concentraciones de este nutriente en MS, entre 1 y 1,5%, sin ser diferentes entre sí. En soja se evidenció una mayor concentración de Ca en el tratamiento con mayor concentración de los nutrientes en solución, pasando de valores de 1,5% a 2,5% de Ca en la MS.

Efecto en la concentración de Mg en MS

La concentración de Mg en MS de raigrás y soja registrados en los tratamientos y cortes con diferente concentración de Ca y relación Ca/Mg se puede observar en la Figura 3A. En raigrás se observó que la concentración de Mg en tejido aumentó con el incremento de hasta 5 mM en la solución nutritiva en los cortes uno y dos, alcanzando los mayores valores con 12 mM en el corte uno, pasando de 0,05% a valores máximos de 0,64%. Sin embargo, en el corte tres se observó una disminución del contenido en vegetal a medida que se incrementó el Ca en solución, alcanzándose concentraciones de 0,72% en el T1 y 0,24% en el T12. En soja no se evidenciaron cambios en las concentraciones de Mg en MS, oscilando en valores de 0,45 a 0,65%.

La concentración de Mg en MS de raigrás y soja respecto a los cortes y los tratamientos con diferente concentración de Ca y Mg e igual relación Ca/Mg (T5 y TD) se puede observar en la Figura 3B.

El tratamiento con mayor concentración de Ca y Mg evidenció una mayor concentración en vegetal solamente en el primer corte de raigrás (0,64% vs 0,45%). Además, se observó que en el segundo corte se encontraron, en general, valores mayores de Mg en MS con respecto a los restantes. El cultivo de soja no incrementó su concentración en la MS ante el incremento de los nutrientes en solución, aunque se observó una mayor concentración de este nutriente en el TD. Los valores en soja fueron similares a los encontrados en raigrás.

Efecto en la exportación de Ca

La exportación de Ca en soja y raigrás respecto a los cortes y los tratamientos con diferente concentración de Ca y relación Ca/Mg se puede observar en la Figura 4A. En raigrás se observaron mayores exportaciones de este elemento a medida que se incrementó la concentración de Ca en solución hasta T9 (9 mM Ca) para la mayoría de los cortes y en la sumatoria de ellos (Figura 4A). En relación con la exportación total, los valores oscilaron entre 0,1 g y 0,5 g de Ca, aumentando hasta un 400%. En soja se incrementó la exportación de Ca hasta T5 (5 mM Ca), oscilando entre valores similares a los encontrados en la exportación total de raigrás anual.

La exportación de Ca en soja y raigrás respecto a los cortes y los tratamientos con diferente concentración de Ca y Mg e igual relación Ca/Mg (T5 y TD) se puede observar en la Figura 4B. Se observaron mayores exportaciones en raigrás en el primer corte y en la sumatoria de ellos a medida que se incrementó la concentración de Ca en solución. Las exportaciones totales rondaron en 0,4 g Ca. En soja se observó una mayor exportación en el tratamiento con mayor concentración de estos nutrientes, incrementándose alrededor de un 100% (1,04 vs 0,46 g).

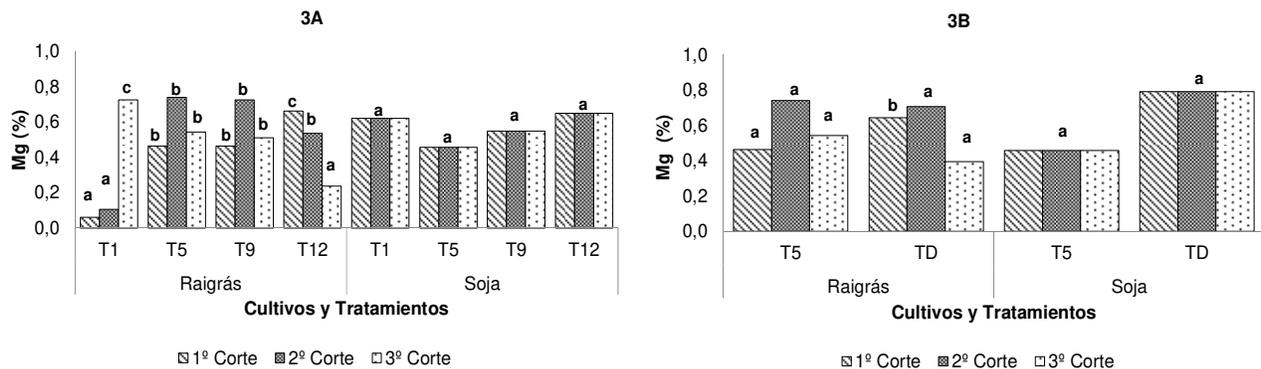


Figura 3. Concentración de Mg en MS vegetativa expresado en % m/m diferenciada por cultivos y cortes. A: tratamientos con diferente concentración de Ca y relación Ca/Mg (T1 a T12); B: tratamientos con diferente concentración de Ca y Mg e igual relación Ca/Mg (T5 y TD). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos para el mismo corte en el mismo cultivo ($p < 0,05$).

Efecto en la exportación de Mg

La exportación de Mg en soja y raigrás respecto a los cortes y los tratamientos con diferente concentración de Ca y relación Ca/Mg se puede observar en la Figura 5A. En raigrás se observaron patrones similares a los encontrados en la concentración en MS de este nutriente para cada uno de los cortes, ya que no hubo diferencias de producción de MS entre ellos. En la sumatoria de extracción se observó que la extracción se incrementó hasta T5 (5 mM Ca), observando una disminución a medida que se incrementaba el Ca en solución. Los valores de exportación total de Mg oscilaron entre 0,1 y 0,2%, aproximadamente. En soja se observó que mayores concentraciones de Ca en solución incrementaron la extracción de Mg, encontrándose las máximas exportaciones en los tratamientos T9 y T12, a pesar de que el T9 no logró diferenciarse estadísticamente del T5. Se observaron valores de

exportación similares a los encontrados en raigrás. La exportación de Mg en soja y raigrás respecto a los cortes y los tratamientos con diferente concentración de Ca y Mg e igual relación Ca/Mg (T5 y TD) se puede observar en la Figura 5B.

Se observaron patrones de exportación en raigrás similares a los encontrados en la concentración de Mg en MS, siendo las mayores exportaciones en el primer corte ante incrementos de Ca en solución, siendo inverso para el tercer corte, e indiferente en la sumatoria, alcanzando valores de exportación total de alrededor de 0,2 g Mg.

En soja se observaron mayores extracciones de este elemento a medida que se incrementó el contenido de los nutrientes en solución, variando de 0,13 g a 0,32 g Mg, y, en consecuencia, incrementando su exportación en valores superiores al 100%.

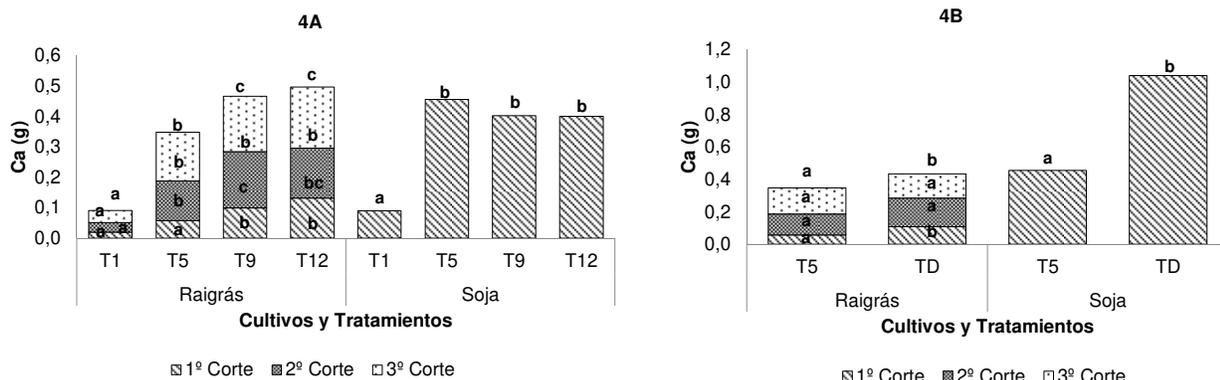


Figura 4. Exportación de Ca expresada en g Ca, diferenciada por cultivos, cortes y sumatoria de cortes en raigrás. A: tratamientos con diferente concentración de Ca y relación Ca/Mg (T1 a T12); B: tratamientos con diferente concentración de Ca y Mg e igual relación Ca/Mg (T5 y TD). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos para el mismo corte o sumatoria de cortes en el mismo cultivo ($p < 0,05$).

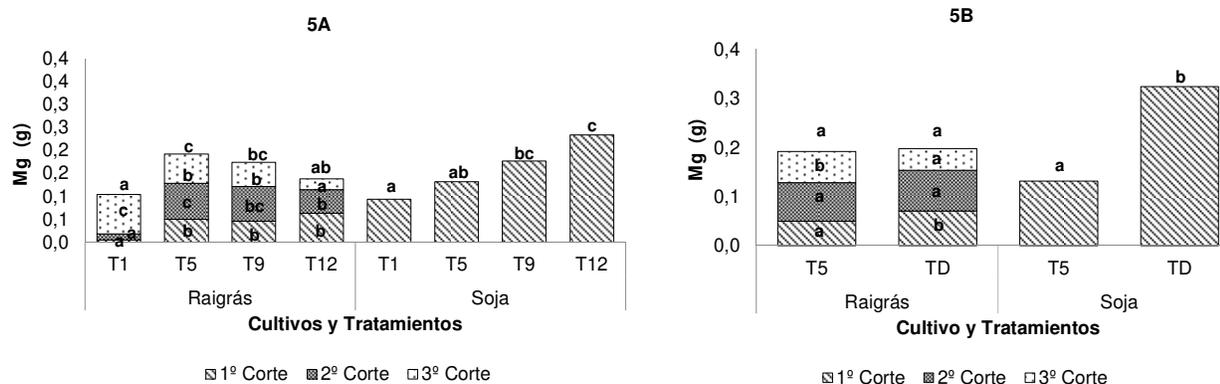


Figura 5. Exportación de Mg expresada en g Mg, diferenciada por cultivos, cortes y sumatoria de cortes en raigrás. A: tratamientos con diferente concentración de Ca y relación Ca/Mg (T1 a T12); B: tratamientos con diferente concentración de Ca y Mg e igual relación Ca/Mg (T5 y TD). Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos para el mismo corte o sumatoria de cortes en el mismo cultivo ($p < 0,05$).

DISCUSIÓN

Efecto en la producción de MS

En soja se pudo observar que el tratamiento con menor concentración de Ca produjo menores rendimientos en MS aérea vegetativa, con una reducción cercana a lo encontrado por De Almeida et al. (2007) en tratamientos con deficiencia cálcica. El valor óptimo de Ca en solución nutritiva considerado para el cultivo de soja (5 mM Ca) fue mucho mayor al reportado por Rayar (1981, citado en Bruns, 2016) quien menciona valores de 0,25 mM Ca. Vivas & Fontanetto (2003) y Barbieri et al. (2015) han evidenciado incrementos en crecimiento de este cultivo ante aumentos en la disponibilidad de Ca en suelos pampeanos, registrando respuesta al incremento de Ca en solución.

La ausencia de respuesta en raigrás sugiere que la disponibilidad de Ca es suficiente en la totalidad de los tratamientos ya que ninguno se encuentra en concentraciones menores a los umbrales de 0,5-1 mM Ca encontradas por Genc et al. (2010) trabajando con otra gramínea (trigo). La posible deficiencia en soja y suficiencia en raigrás evidenciaría los menores requerimientos que poseen las gramíneas con respecto a las leguminosas, mención ya realizada por otros autores (White & Broadley, 2003, citado en Marschner 2012; García & Correndo, 2016).

A su vez, no puede descartarse la importancia de la relación Ca/Mg. La similitud en la producción de MS en tratamientos con igual relación podría deberse a que el efecto de relaciones inadecuadas entre los mismos solo se manifestarían en concentraciones más limitantes. Para el caso del Ca, como se mencionó anteriormente, las concentraciones elegidas para los tratamientos están por encima del umbral mínimo para estos y otros cultivos (Rayar, 1981, en Bruns, 2016; Zharare et al., 2009; Singh et al., 2014). Estos resultados están de acuerdo con varios autores que desestiman la importancia del diagnóstico nutricional por cantidades relativas de los nutrientes disponibles (Kopittke & Menzies, 2007; Chaganti & Culman, 2017).

Efecto en la concentración de Ca en MS

Loneragan & Snowball (1969) mencionan que la concentración en planta se encuentra restringida fundamentalmente por la genética del cultivo, siempre y cuando la provisión de Ca sea adecuada. Sin embargo, en este trabajo, se evidenció una mayor dependencia a la concentración en solución en los primeros estadios vegetativos del cultivo de raigrás. Por otro lado, según los valores registrados, se observó un aumento hasta concentraciones de 9 mM Ca en el vegetal, a diferencia de los valores de 2 mM Ca para trigo y 20 mM Ca para mijo mencionados por Genc et al. (2010) y Singh et al. (2014), respectivamente. En soja se pudo observar que la concentración en planta fue mayor en las situaciones intermedias (T5 y T9). Los resultados coinciden con Alva et al. (1991) quienes evidenciaron incrementos trabajando entre 0,5 a 2 mM de Ca en soja. Más aún, en la experiencia realizada se evidenciaron incrementos hasta 5 mM Ca. La concentración de Ca podría ser regulada mayormente por la genética del cultivo de soja a partir de 5 mM Ca como mencionan Loneragan & Snowball (1969).

Las diferencias encontradas en los crecimientos ante la mayor concentración de nutrientes a igual relación Ca/Mg sugiere que la disponibilidad de ambos nutrientes sería la principal responsable de la concentración de Ca en vegetal por sobre la relación entre ellos. Se podría asociar un efecto de la relación en el control de la concentración en estadios vegetativos más avanzados del cultivo de raigrás. El cultivo de soja sugiere un efecto positivo de la concentración de Mg en solución, ya que los tratamientos con menor e igual concentración de Mg (T5, T9 y T12) no presentaron diferencias significativas en la concentración vegetal de Ca.

Efecto en la concentración de Mg en MS

El antagonismo entre Ca y Mg que mencionan algunos autores (Zharare et al., 2009; Prasad, 2010; Jezek et al., 2015, citado en Sun et al., 2018; Bruns, 2016) conjuntamente con el mayor consumo de Mg ante bajas concentraciones de Ca en solución (Hermans et al., 2010a, 2010b, citado en Guo et al., 2016) se observó solamente en estadios vegetativos más avanzados del cultivo de raigrás. No se produjo interacción negativa entre los nutrientes en estadios vegetativos tempranos de este cultivo. Por lo contrario, en estadios vegetativos tempranos de raigrás el contenido de Mg en MS se incrementó ante mayores concentraciones de Ca en solución evidenciando que el antagonismo mencionado por los autores podría depender de otros factores también más que la simple relación entre las concentraciones de los nutrientes.

Por otro lado, según el comportamiento observado en los tratamientos con igual relación Ca/Mg, se podría hacer mención que la concentración de los nutrientes podría ser la principal responsable de la concentración de Mg en vegetal por sobre la relación entre ellos en estadios vegetativos tempranos de raigrás. El cultivo de soja no incrementó su concentración en la MS ante el incremento de los nutrientes en solución.

Efecto en la exportación de Ca

La exportación de Ca en soja y raigrás respecto a los cortes y los tratamientos con diferente concentración de Ca y relación Ca/Mg se puede observar en la Figura 4A. En raigrás se observaron mayores exportaciones de este elemento a medida que se incrementó la concentración de Ca en solución hasta 9 mM Ca para la mayoría de los cortes y en la sumatoria de ellos (Figura 4A). Este comportamiento se asocia mayormente al contenido en MS de este nutriente debido a que a la producción de materia seca se mantiene constante en todas las concentraciones de Ca. En soja se incrementó la exportación de calcio hasta 5 mM Ca, aunque dicho comportamiento, a diferencia del raigrás, puede atribuirse tanto a la concentración en MS de este nutriente como también a la producción de MS.

La exportación de Ca en soja y raigrás respecto a los cortes y los tratamientos con diferente concentración de Ca y Mg e igual relación Ca/Mg (T5 y TD) se puede observar en la Figura 4B. Se observaron mayores exportaciones en raigrás en el primer corte y en la sumatoria de ellos a medida que se incrementó la concentración de Ca en solución, asociado, al igual que el caso anterior, a mayores concentraciones de este elemento en planta, ya que el crecimiento fue semejante.

En soja se observó una mayor exportación, alcanzando los mayores valores encontrados entre todos los tratamientos. Se asocia fundamentalmente a las mayores concentraciones de este elemento en el vegetal.

Efecto en la exportación de Mg

La exportación de Mg en raigrás ante diferentes concentraciones de Ca en solución tuvo un comportamiento similar a la concentración en MS de este nutriente. Esto se debió a que no hubo diferencias en producción de MS entre tratamientos. Las mayores extracciones en los valores intermedios se asociaron a que, en estas concentraciones, la concentración de Mg en la MS se mantuvo en valores intermedios-altos para la totalidad de los cortes, mientras que los tratamientos restantes manifestaron valores altos y bajos en diferentes cortes. Las mayores concentraciones de Ca en solución que incrementaron la extracción de Mg en soja se asociaron tanto al mayor crecimiento en MS, de T1 a T5 (1 a 5 mM Ca), como al mayor contenido de Mg, de T5 a T12 (5 a 12 mM de Ca), aunque sin diferencias significativas entre ellos.

Las diferencias en las exportaciones de Mg en raigrás para los tratamientos con igual relación Ca/Mg se asoció fundamentalmente al contenido de este elemento en MS. La similitud en la exportación total se asoció a la compensación que existió entre la mayor exportación del primer corte y la menor exportación del tercer corte en el tratamiento con mayor cantidad de nutrientes. Las diferencias en soja se asociaron tanto a la producción de MS como a la concentración en MS que, en ambos casos y a pesar de no ser significativos, produjeron mayores valores de ambas variables.

CONCLUSIÓN

Se concluye que los niveles de nutrición cálcica tienen influencia sobre la producción de MS, concentración en MS y exportación de Ca y Mg, independientemente de la relación Ca/Mg, en raigrás anual y soja forrajera.

En raigrás anual los niveles de nutrición cálcica influyen sobre las concentraciones y exportación aérea de Ca y Mg en MS, mientras que no modifican la producción de MS. En este cultivo, la concentración de Ca y Mg define, por sobre la relación Ca/Mg, la concentración de Ca y Mg en MS en estadios vegetativos tempranos; la exportación de Ca en estadios vegetativos tempranos y, en consecuencia, en la exportación total de este nutriente. Además, el contenido de Mg en MS también depende de la concentración de Ca y Mg por sobre la relación Ca/Mg en estadios vegetativos avanzados de raigrás y, en consecuencia, en la exportación total de este nutriente.

En soja forrajera los niveles de nutrición cálcica influyen sobre la producción de MS, concentraciones de Ca en MS y en la exportación de Ca y Mg, mientras que no modifican la concentración de Mg en MS. En este cultivo, el contenido de Ca en MS y la exportación de Ca y Mg dependen de la concentración de Ca y Mg, mientras que no muestran dependencia de la relación Ca/Mg.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los Ing. Agr. M. Aued y N. Malchiodi, y al Instituto de Fisiología Vegetal (INFIVE) por su enorme contribución a la realización de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbona, E, M Presutti & S Sarandón.** 2018. Balance de nutrientes en la producción hortícola de la provincia de Buenos Aires. Acta de conferencias, mesas panel, trabajos completos, comunicaciones y resúmenes. XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo: 786-790.
- Alva, AK, DG Edwards & CJ Asher.** 1991. Effects of acid soil infertility factors on mineral composition of soybean and cowpea tops. *Journal of plant nutrition* 14: 187-203.
- Barbieri, PA, HE Echeverría, HR Sainz Rozas & JP Martínez.** 2015. Soybean and wheat response to lime in no-till Argentinean mollisols. *Soil & Tillage Research* 152: 29-38.
- Bruns, HA.** 2016. Macro-Nutrient Concentration and Content of Irrigated Soybean Grown in the Early Production System of the Midsouth. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 47: 17.
- Chaganti, V & S Culman.** 2017. Historical Perspective of Soil Balancing Theory and Identifying Knowledge Gaps: A Review. *Crop Forage Turfgrass Manage* 3: 1-7.
- CIafa.** 2018. Consumo de Fertilizantes, Cámara de la Industria Argentina de Fertilizantes y Agroquímicos. Disponible en: <https://ciafa.org.ar/files/Wtc9G6pkM7DTMAB5TfxqAOaYHg2JhZEBhau5lhZO.pdf>. Último acceso: mayo de 2019.
- Ciarlo, E, D Cosentino, M García & F González.** 2018. Análisis de participación de laboratorios de suelos en el programa PROINSA. Acta de conferencias, mesas panel, trabajos completos, comunicaciones y resúmenes. XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo: 45-49.
- De Almeida, T, R Alves Flores, HJ De Almeida, R De Mello Prado, D Carvalho Maranhão & L Sanches Politi.** 2017. Development and nutrition of soybeans with macronutrients deficiencies. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*: 48 (13): 1616-1625
- Di Rienzo, JA, F Casanoves, MG Balzarini, L Gonzalez, M Tablada & CW Robledo.** 2015. InfoStat versión 2015. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL: <http://www.infostat.com.ar>. Último acceso: noviembre de 2018.
- Fanello, D.** 2016. Cambios estructurales y funcionales en las mitocondrias durante la senescencia de hojas y raíces. La Plata (Buenos Aires): Tesis de doctorado. Universidad Nacional de La Plata.
- Gambaud, S, L Picco, P Soldano & A Cervetti.** 2007. Fertilización compuesta con calcio, magnesio y azufre en soja. Resultados experiencias campaña 2006/07. INTA. EEA Rafaela. Información Técnica cultivos de verano. Publicación Miscelánea N°108: 185-189.

- García, F & A Correndo.** 2016. Cálculo de Requerimientos Nutricionales - Versión 2016. Cultivos de Cereales, Oleaginosas, Leguminosas, Industriales, Forrajeras y Hortalizas. Disponible en: <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1024>. Último acceso: mayo de 2019.
- García, M & M Presutti.** 2018. Extracción de bases del modelo productivo, en los suelos de la provincia de Buenos Aires. Acta de conferencias, mesas panel, trabajos completos, comunicaciones y resúmenes. XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo: 526-531.
- Genc, Y, M Tester & GK McDonald.** 2010. Calcium requirement of wheat in saline and non-saline conditions. *Plant Soil* 327:331-345.
- Girón, P, A Macchiavello, M Barraco, C Ottaviano, DA Ferro & M Vázquez.** 2016. Aplicación de correctores básicos y fertilizantes cálcico-magnésicos en el cultivo de soja. *Informaciones Agronómicas* 24: 20-23.
- González, B, S Gambaudo, D Bersano, D Tenorio, J Neifert & D Osenda.** 2001. Enmiendas en trigo. *Fertilizar* 6(23): 18-19.
- Granssee, A & H Fühns.** 2013. Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions. *Plant and Soil* 368 (1-2):5-21.
- Guo, W, H Nazim Z, Lianga & D Yanga.** 2016. Magnesium deficiency in plants: An urgent problem. *The Crop Journal* 4: 83-91.
- Hermans, C, M Vuylsteke, F Coppens, SM Cristescu, FJ Harren, D Inzé & N Verbruggen.** 2010a. Systems analysis of the responses to long-term magnesium deficiency and restoration in *Arabidopsis thaliana*. *New Phytol.* 187: 132-144.
- Hermans, C, M Vuylsteke, F Coppens, A Craciun, D Inzé & N Verbruggen.** 2010b. Early transcriptomic changes induced by magnesium deficiency in *Arabidopsis thaliana* reveal the alteration of circadian clock gene expression in roots and the triggering of abscisic acid-responsive genes. *New Phytol.* 187: 119-131.
- Hoagland D & D Arnon.** 1950. The water culture method for growing plants without soil. *California Agricultural Experimental Station Circular.* University of California, Issue 347, pp. 1-32.
- Jezek, M, CM Geilfus, A Bayer & KH Mühlhng.** 2015. Photosynthetic capacity, nutrient status, and growth of maize (*Zea mays* L.) upon MgSO₄ leaf-application. *Frontiers in Plant Science* 5: 781.
- Kalra, Y.** 1998. Handbook of reference methods for plant analysis. Soil and Plant Analysis Council, Inc. New York: CRC Press.
- Kopittke, P & N Menzies.** 2007. A Review of the Use of the Basic Cation Saturation Ratio and the "Ideal" Soil. *SSSAJ* 71(2): 259-265.
- Legget, J & M Frere.** 1971. Growth and nutrient uptake by soybean plants in nutrient solutions of graded concentrations. *Plant Physiology*, 48(4), pp. 457-460.
- Loneragan, JF & K Snowball.** 1969. Calcium requirements of plants. *Australian Journal of Agricultural Research*, 20, 465-478.
- Marschner, H.** 2012. Mineral nutrition of higher plants. Third Edition ed. London: Academic Press. 651 pp.
- Martínez, F & G Cordone.** 2008. Soja para Mejorar la Producción/ 39 Estación Experimental Agropecuaria Oliveros Centro Regional Santa Fe ISSN 1850-163X p. 78-80.
- Melgar, R, J Lavandera & ME Camozzi.** 1999. Fertilización balanceada, clave para la alta productividad. *INTA Fertilizar* 17: 24-25.
- Miravé, J, J Tognetti, L Aguirrezábal & S Assuero.** 2014. Fundamentos de la Nutrición Mineral en Plantas. En: H. Echeverría & F. García, eds. *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos.* 2da Ed. Buenos Aires: INTA Ediciones, pp. 131-154.
- Pourranjbari Saghaiesh S, M Kazem Souri & M Moghaddam.** 2018. Effects of different magnesium levels on some morphophysiological characteristics and nutrient elements uptake in Khatouni melons (*Cucumis melo* var. inodorus). *Journal of Plant Nutrition* 42(1): 27-39.
- Prasad, R.** 2010. Calcium/magnesium ratio and water potential effects on forage quality and pectin concentration. Thesis of Master of Science In Plant and Soil Sciences. West Virginia University. 106 pp.
- Presutti, M.** 2016. Extracción y reposición de nutrientes en la agricultura bonaerense. *Memorias del XXI Congreso Latinoamericano de la Ciencia del suelo y XV Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo:* 736-743.
- Presutti, M.** 2018. Susceptibilidad a la acidificación edáfica por extracción de nutrientes básicos por la agricultura extensiva bonaerense. Acta de conferencias, mesas panel, trabajos completos, comunicaciones y resúmenes. XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo: 673-678.
- Presutti, M, M García & M Vázquez.** 2016. Acidificación de los suelos de la pradera pampeana. Mapeo de la saturación básica y de los índices relativos. XXI Congreso Latinoamericano y XV Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo: 507-512.
- Rayar, A.** 1981. Effect of calcium concentration on growth and ion uptake in soybean plants in solution culture. *Z. Pflanzenphysiologie* 105:59-64.
- Sainz Rozas, H, M Eyherabide, H Echeverría, P Barbieri, H Angelini & G Larrea.** 2013. ¿Cuál es el estado de la fertilidad de los suelos argentinos? In: García, F.O., Correndo, A.A. (Eds.), *Simposio Fertilidad 2013. Nutrición de cultivos para la intensificación productiva sustentable.* International Plant Nutrition Institute, Rosario pcia. de Santa Fe, pp. 62-72.
- Singh, U, D Pandey & A Kumar.** 2014. Determination of calcium responsiveness towards exogenous application in two genotypes of *Eleusine coracana* L. differing in their grain calcium content. *Acta Physiol Plant* 36: 2521-2529.
- Sun, X, L Liu, J Chen, A Rosanoff, X Xiong, Y Zhang & T Pei.** 2018. Effects of magnesium fertilizer on forage crude protein content depend upon available soil nitrogen. *J. Agric. Food Chem* 66(8).
- Vázquez, M & A Pagani.** 2014. Calcio y magnesio. Manejo de fertilización y enmiendas. En: H. Echeverría & F. García, eds. *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos.* Buenos Aires: INTA, pp. 317-350.
- Vivas, H & H Fontanetto.** 2003. Fósforo, azufre y calcio en la producción de soja en el Departamento San Justo. 2002/2003. INTA, Estación Experimental Agropecuaria Rafaela. Información Técnica de cultivos de verano. Campaña 2003. Publicación Miscelánea N°100, N°15, 5 pp.

Vivas, H, H Fontanetto & R Abrecht. 2001. Fertilización con calcio, magnesio y azufre sobre la producción de maíz en dos sitios del centro de Santa Fe. Publicación miscelánea EEA Rafaela N° 95: 1-5.

White, P & M Broadley. 2003. Calcium in plants. *Ann Bot* 92:487–511.

Wolt, J. & F Adams. 1979. Critical levels of soil and nutrient-solution calcium for vegetative growth and fruit development of Florunner peanuts. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43:1159-1164.

Zharare, G, C Asher & F Blamey. 2009. Calcium Nutrition of Peanut Grown in Solution Culture. I. Genetic Variation in Ca Requirements for Vegetative Growth, *Journal of Plant Nutrition*, 32:11, 1831-1842.