

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y FORESTALES



INFORME DE TRABAJO FINAL DE CARRERA

**HUELLA MINERAL DE LOS NUTRIENTES BÁSICOS DE LA ACTIVIDAD
AGRÍCOLA EN SUELOS BONAERENSES.**

Carrera: Ingeniería Agronómica

Alumno: Stefano Dell'Arciprete

Legajo: 27206/8

DNI: 38.104.631

Correo electrónico: stefanodell_23@hotmail.es

Tel: 2345-514646

Directora: Miriam Presutti

Codirectora: Mirta Graciela García

Modalidad: Investigación bibliográfica referida a una temática de relevancia de un área de las Ciencias Agrarias y Forestales.

Fecha de entrega:

ÍNDICE

RESUMEN	2
INTRODUCCIÓN	3
OBJETIVOS	7
MATERIALES Y MÉTODOS	7
Nutrientes básicos en el suelo	7
Análisis de estimaciones agrícolas	8
Huella Mineral	8
Mapas de Susceptibilidad	9
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	9
Nutrientes básicos en el suelo	9
Análisis de estimaciones agrícolas	13
Huella Mineral. Extracción de nutrientes.	17
Mapas de Susceptibilidad	24
CONCLUSIÓN	25
BIBLIOGRAFÍA	27

RESUMEN

En las áreas templadas de nuestro país, la acidificación se genera fundamentalmente por la intensa actividad agropecuaria, donde el fuerte aumento en la producción de granos en las últimas décadas, principalmente la sojización, provocó un deterioro físico, químico y biológico a expensas de consumir anualmente los nutrientes almacenados en el suelo.

Los objetivos de este trabajo fueron evaluar cómo esta transformación repercutió en la disponibilidad de las bases de los suelos pampeanos, disminuyendo su provisión, y dando como resultado zonas susceptibles de ser degradadas por la demanda diferencial y sesgada de cationes básicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+).

Con dicho fin, se analizaron los datos analíticos del horizonte superficial de 217 series de suelos presentes en la provincia de Buenos Aires para obtener el dato de disponibilidad en kg ha^{-1} de cada base y su saturación relativa; llevándose a cabo además, la cuantificación anual por partido, desde la campaña 1969/70 hasta la 2015/16 de la "Huella Mineral", que es la extracción de cada base en kg ha^{-1} y en Tn por los principales cultivos agrícolas pampeanos: el trigo, la soja, el girasol y el maíz.

Los resultados indican que se extrajeron 9,36 millones de Tn de nutrientes básicos, en las 47 campañas por los cuatro cultivos, correspondiendo el 10 % al Ca^{2+} , 21 % de Mg^{2+} y 69 % para el K^+ , siendo la soja responsable del 59 % de dicha extracción. Las mayores tasas de extracción de los tres nutrientes se produjeron en los partidos del norte de la provincia y las menores en el este; contabilizando valores máximos de más de 400 kg ha^{-1} de Ca^{2+} , 1000 de Mg^{2+} y 3500 de K^+ .

Por último, se elaboraron mapas de susceptibilidad a la acidificación, teniendo en cuenta el % de extracción de cada base en todo el período, respecto de su disponibilidad inicial.

INTRODUCCIÓN

En la región pampeana argentina las actividades económicas predominantes son la agricultura (cereales y oleaginosas) y la ganadería (vacuna y ovina), las cuales conforman el 75 % del valor total exportado (Consultora Economía & Regiones, 2017). La provincia de Buenos Aires con más de 30 millones de hectáreas, destina 10 millones de ha para cultivos agrícolas y la actividad ganadera se desarrolla en el 54 % de su superficie (Abbona et al., 2016). Por estímulos fundamentalmente de índole económicos, y en respuesta al fuerte incremento de la demanda mundial de alimentos, los recursos naturales y económicos se han asignado hacia la agricultura continua, la cual ha tomado gran preponderancia y se ha convertido en la base de las explotaciones agrícolas de Argentina, desplazando producciones mixtas y ganaderas a zonas marginales, originando el fenómeno conocido como “agriculturización” (Cruzate & Casas, 2009; Manchado, 2010). La producción agropecuaria viene experimentando un cambio de rumbo, en la provincia de Buenos Aires se duplicó la superficie cosechada con trigo (*Triticum aestivum* L.), maíz (*Zea mays* L.), soja (*Glycine max* L.) y girasol (*Helianthus annuus* L.) en los últimos 47 años, mientras que la producción se incrementó un 324 %, en consonancia con los mayores rendimientos, sobre todo de los cultivos estivales. A su vez, a nivel país, se triplicó el área cosechada para el mismo periodo y se sextuplicó la producción de estos granos (García & Presutti, 2018). El proceso de “agriculturización” se define como el uso creciente y continuo de las tierras para cultivos agrícolas. También se asocia a cambios tecnológicos, intensificación ganadera, expansión de la frontera agropecuaria hacia regiones extra-pampeanas y la tendencia de la agricultura hacia el desarrollo de producciones orientadas al monocultivo, principalmente soja (Michelena et al., 2010). Este fenómeno denominado “sojización” tuvo como principal desencadenante la implementación en los años 1996/1997 de las variedades RR de soja transgénica, -resistentes al herbicida

glifosato-, que simplifican el control de malezas pero tienen una alta dependencia de insumos. Junto con la difusión de la siembra directa, provocó la notable expansión del área bajo este cultivo en distintos lugares del país y como consecuencia de la producción, la República Argentina se posicionó como el tercer productor mundial de grano y el primer exportador mundial de aceites (Strada & Vila, 2016).

La siembra de esta leguminosa permite realizar el doble cultivo trigo/soja en un mismo año aumentando así el beneficio económico de la explotación, por lo cual se han sustituido cultivos como el maíz o el girasol, pero sin tener en cuenta el empobrecimiento del suelo y el incremento de la vulnerabilidad de los sistemas de producción (Manchado, 2010). La predominancia del cultivo genera deficiencias de nutrientes selectivas en el suelo, de acuerdo a la composición química del grano que se extrae (García & Presutti, 2018).

Un indicador para medir el impacto de la agricultura en la degradación del suelo es la Huella Mineral (HM) propuesto por Vicente y Engler en el año 2011. En el sector agropecuario, la HM contabiliza en términos físicos -kilos/toneladas- los niveles de exportación de minerales como la sumatoria de las cantidades de nutrientes contenidas en los granos producidos en una región y período determinados. Debido a que los productos contienen varios minerales, la HM puede indicar la suma de un conjunto de minerales o puede referir a un solo mineral.

El modelo de agricultura extractiva, se agrava en el caso de los nutrientes básicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+), debido a que su reposición es escasa o nula (Gelati & Vázquez, 2007; Cruzate & Casas, 2009), situación que conlleva, entre otras causas, a la acidificación de los suelos del ámbito templado. El descenso del pH se debe a la extracción de bases por parte de los cultivos, sin la posterior reposición de nutrientes, lo que conduce a una disminución en la saturación con bases del complejo de intercambio catiónico de los suelos (Vázquez, 2005) aunque en la región pampeana no se han registrado pH inferiores a 5,5 (Rimatori, com. Pers., 2018).

Sainz Rozas et al., (2014) encontraron disminuciones del 12 % en el contenido de Ca^{+2} intercambiable en suelos con más de 15 años de agricultura comparados con suelos prístinos testigos, obteniendo los valores más altos en el Sur de la provincia de Buenos Aires y los más bajos en el noreste. Analizando situaciones prístinas y agrícolas del centro del país, señalan que el noroeste de la Provincia de Buenos Aires tenía condiciones originales con bajos valores de Ca intercambiable, que se extendieron arealmente en la región a causa del uso. Respecto al Mg^{+2} la disminución es de alrededor de 18 %, no obstante la disponibilidad del mismo está en el rango de alta a muy alta y no detectaron zonas con valores menores al umbral crítico de 50 o 60 mg kg^{-1} (Havlin et al., 2005). La actividad agrícola disminuyó en promedio un 23,5 % el K^{+} intercambiable, valor que supera al determinado para Ca^{+2} y Mg^{+2} , lo que se explicaría por la mayor exportación en los granos de K^{+} respecto a Ca^{+2} y Mg^{+2} . La disponibilidad de K^{+} en esta zona es alta a muy alta, con valores dos a tres veces mayores que el umbral de respuesta (150-175 mg kg^{-1}) (Conti & García, 2006).

Las reservas a largo plazo provienen de la mineralización de los residuos orgánicos y de la estructura mineral que los provee, como así también se pueden perder por erosión o lixiviación. La velocidad de estos procesos está determinada por la naturaleza y composición química de los coloides del suelo (Havlin et al., 1999; Mengel & Kirkby, 2000), las condiciones climáticas y el manejo antrópico. Otro proceso que condiciona la nutrición vegetal, es la interacción entre cationes, donde niveles excesivos de uno puede causar deficiencias relativas de otros por antagonismo. Si bien no existen calibraciones regionales en el país, luego de una amplia revisión bibliográfica, Vázquez & Pagani (2015) publicaron los siguientes umbrales críticos: $(\text{Ca}+\text{Mg})/\text{K} = (7-11)/1$; $\text{Ca}/\text{Mg} = (3-15)/1$ y $\text{Ca}/\text{K} = 13/1$; utilizados como uno de los criterios de diagnóstico para identificar deficiencias relativas de algún catión en particular. Un valor superior a estos umbrales indicaría deficiencias relativas de los elementos del denominador, para la mayoría de los cultivos con un rango de variación,

según condiciones edafo-climático-culturales del sitio en estudio. Por ejemplo, altos niveles de K, a causa de un elevado contenido de micas e illita en la fracción mineral en el suelo, provocarían deficiencias inducidas de Ca y particularmente Mg. Esta situación está presente en muchas áreas de la Región Pampeana. Otros factores como baja temperatura, baja disponibilidad de P y condiciones de saturación hídrica, son predisponentes a estas deficiencias (Vázquez, 2014). Además de las determinaciones de las cantidades relativas o “relaciones ideales” entre algunos de los cationes, el diagnóstico puede realizarse a través de valoraciones absolutas, ya que se puede analizar el contenido porcentual de calcio, magnesio o potasio respecto a la sumatoria de las bases. Se consideran rangos de suficiencia para calcio entre el 65 – 85 %, para magnesio 6-12 % y el potasio entre 2-5 % (INTA, 1989). En algunos casos estas evaluaciones de valores absolutos se enmarcan, para un diagnóstico más ajustado, en la saturación básica del suelo ($S = \frac{\sum Ca, Mg, K, Na \text{ intercambiables}}{CIC} * 100$), considerándose valores apropiados entre el 60-85 % (Vázquez, 2014). Dichas medidas de diagnóstico utilizan la concentración de estos elementos en la situación de intercambio. Para suelos neutros a ligeramente ácidos, no salinos ni calcáreos, el método más ampliamente difundido es la determinación a partir de la extracción con acetato de amonio 1N pH 7 y la determinación por complejometría con EDTA, donde la CI se expresa como “moles de iones carga intercambiados por unidad de masa seca de suelo” (cmolc/kg) (Pellegrini, 2014).

En la presente tesis se cuantificó el contenido de los cationes básicos que han sido extraídos del suelo y no se han repuesto, por los principales granos y cereales cultivados en la provincia de Buenos Aires: trigo, maíz, soja y girasol. Para la generación de los mapas se utilizó un Sistema de Información Geográfica (SIG), herramienta que permite relacionar cualquier tipo de dato con una localización geográfica. Es un conjunto de hardware, software y datos geográficos, y los muestra en una representación gráfica. Los SIG están diseñados para capturar, almacenar,

manipular, analizar y desplegar la información de todas las formas posibles de manera lógica y coordinada.

OBJETIVOS

El objetivo general del trabajo consistió en determinar zonas en la provincia de Buenos Aires susceptibles a la acidificación edáfica ocasionada por la continua extracción de bases por la agricultura extensiva.

Siendo los objetivos específicos:

- Cuantificar la dotación de bases en las series de suelos de la provincia de Buenos Aires.
- Cuantificar la Huella Mineral de los nutrientes básicos Ca^{+2} , Mg^{+2} y K^{+1} desde la década del 70 hasta la actualidad, de los principales cultivos extensivos: trigo, maíz, girasol y soja.

MATERIALES Y MÉTODOS

Nutrientes básicos en el suelo

Se generó una base de datos con los datos analíticos del horizonte superficial de las más de 200 series de suelos presentes en la provincia: contenidos intercambiables de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} ; Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), y profundidad. A partir de esta base de datos y en un entorno SIG, se generaron diferentes mapas temáticos, por un lado, porcentaje de saturación de los cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+}) para determinar áreas con suficiencia/insuficiencia de cada uno respecto a la sumatoria de bases; y por otro los contenidos expresados en kg ha^{-1} . Para esto último, se convirtieron los valores de los contenidos de los cationes, expresados en meq cada 100 g de suelo a kg ha^{-1} , considerando el peso atómico y la carga de cada catión, la densidad aparente y la profundidad del horizonte superficial.

Se utilizaron los siguientes valores de equivalencias: 200, 121,5 y 391 mg de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ respectivamente por kg de suelo. Se estimó un valor de densidad aparente para cada una de la series, en función de la clase textural del horizonte superficial. Los valores de densidad adoptados están comprendidos entre $1,1 \text{ g cm}^{-3}$ para suelos arcillosos y $1,4 \text{ g cm}^{-3}$ para los de textura más gruesa (Porta et al., 1994). La profundidad del horizonte superficial fue la consignada en las cartas de suelo, variable según la serie. En un entorno SIG, se asociaron los datos analíticos de la serie dominante a los polígonos de las unidades cartográficas, escala 1:50.000. No se analizaron las unidades cartográficas definidas como complejos ni los partidos del sur bonaerense, Villarino y Patagones, por no contar con las cartas de suelos en la escala de trabajo. Finalmente se calculó un valor medio de la disponibilidad de cada catión por partido, mediante la ponderación de la superficie ocupada por las unidades cartográficas en cada partido y su correspondiente valor de disponibilidad.

Análisis de estimaciones agrícolas

Se analizó y evaluó la evolución de la superficie cosechada (ha), producción (Tn) y rendimiento (kg ha^{-1}), para los partidos de la provincia de Buenos Aires durante 47 campañas, desde la campaña 1969/70 hasta la 2015/16 de los cuatro cultivos principales: trigo, maíz, soja y girasol, consignados en las series de estimaciones agrícolas elaboradas por el actual Ministerio de Agroindustria de la Nación.

Huella Mineral

Para cada partido de la provincia y para cada cultivo por separado, se calcularon los nutrientes básicos extraídos en función de los rendimientos obtenidos utilizando la planilla elaborada por IPNI, Cálculo de requerimientos nutricionales (IPNI, 2016). Las extracciones en kg ha^{-1} de todas las campañas y todos los cultivos fueron sumadas por partidos para generar mapas para cada nutriente.

La extracción total en Tn de cada nutriente por cada cultivo, se determinó por la sumatoria de la extracción en cada partido, calculada como la extracción en kg ha^{-1} multiplicada por la superficie cosechada.

Mapas de Susceptibilidad

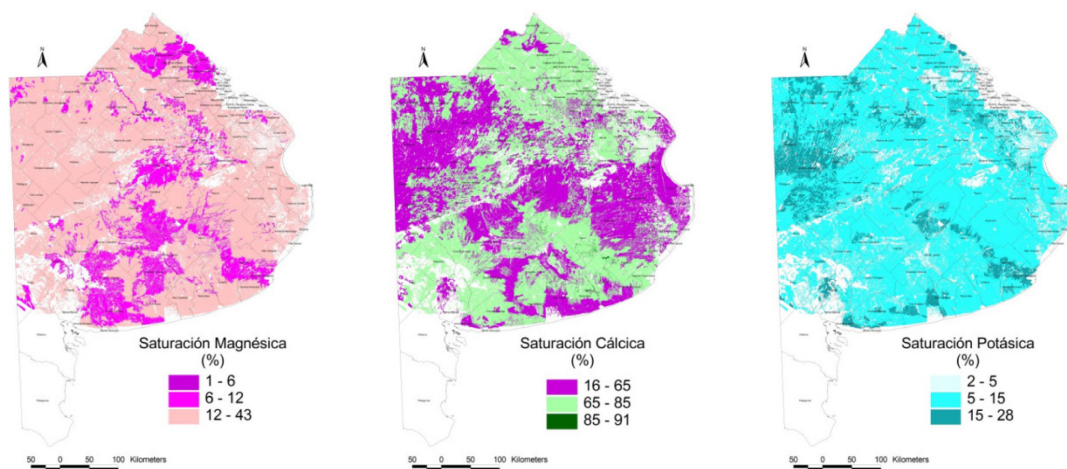
Para cada partido y para los tres nutrientes se calculó la proporción entre la disponibilidad, en kg ha^{-1} , relevada en las cartas de suelo y la extracción total, o HM en kg ha^{-1} , provocada por los cuatro cultivos analizados en las 47 campañas agrícolas. El indicador de la susceptibilidad a la acidificación se expresa como porcentaje de extracción respecto a la condición original.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Nutrientes básicos en el suelo

Se analizó la saturación básica total del suelo, como así también la saturación relativa de cada base con respecto a la sumatoria de las mismas. Se encontraron valores de saturación básica total superiores a 66 % en toda la provincia. Según Vázquez & Pagani (2015) este valor se encuentra dentro del rango de valores apropiados (60-85 %).

En el Mapa 1 se muestran las saturaciones relativas de cada nutriente básico, con respecto a la sumatoria de bases.



Mapa 1. Saturación magnésica, cálcica y potásica, de las unidades cartográficas.

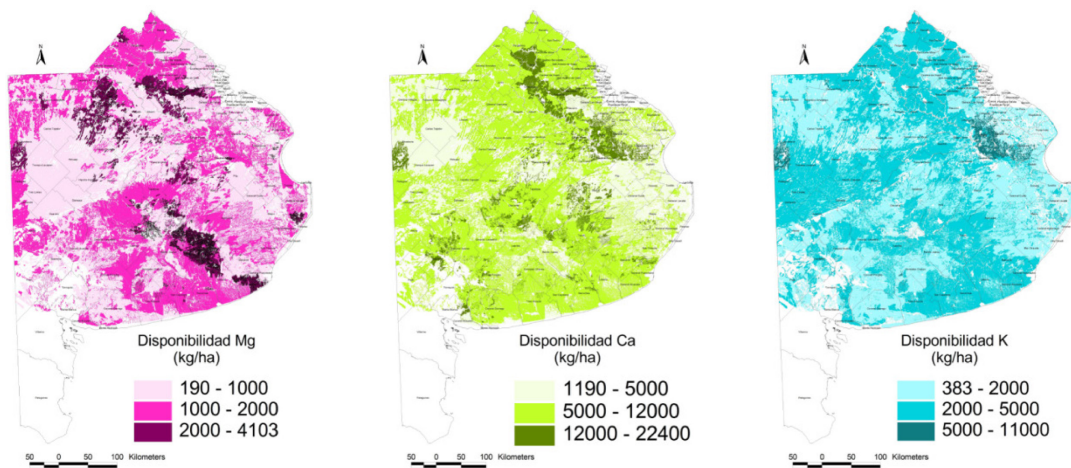
En lo que respecta a la saturación relativa de cada catión con respecto a la sumatoria de bases (Mapa 1), se encontraron valores que oscilan entre 16 y 91 % para Ca^{+2} , indicando que existen amplias zonas con deficiencia de este nutriente; valores entre 6 y 43 % para Mg^{+2} con una pequeña superficie en el partido de Alberti con valores por debajo de 6 %; para K^{+} valores entre 2,75 y 28 %, donde ambos se encuentran en el rango de los valores de suficiencia acorde a INTA (1989). Gambaudo y Fontanetto (2011) establecieron como nivel adecuado cuando el % de saturación con magnesio es superior al 7 %, moderado entre 5 y 6 % y bajo por debajo del 5 %.

Según los criterios establecidos por INTA (1989) se consideran valores apropiados de saturación cálcica entre 65 y 85 %, existiendo valores inferiores al adecuado en gran parte de la provincia, por ejemplo las series encontradas en el:

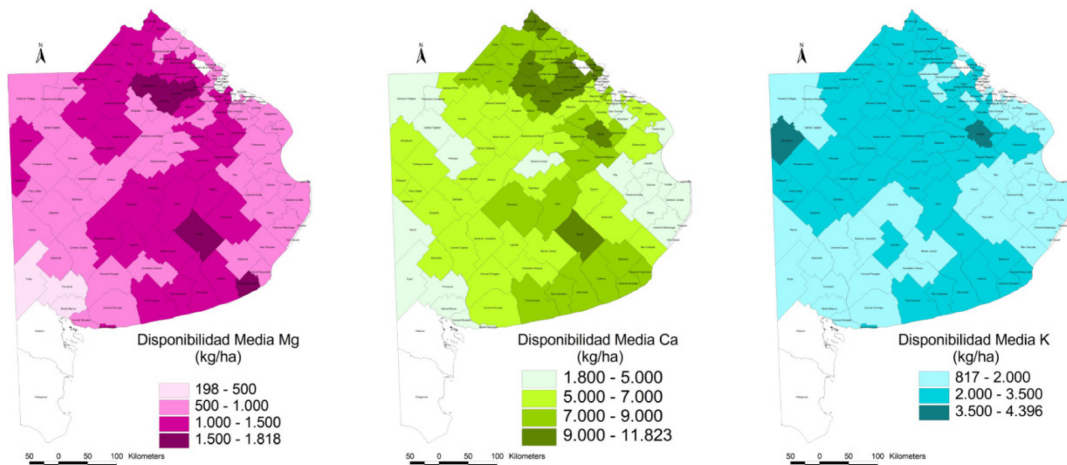
- noroeste (NO): Serie Vedia (26,23 %), partido de Lincoln;
- centro (C): Serie La Paulina (30,19 %) y Serie La Emma (27,92 %), partido de Alvear;
- sudeste (SE): Serie Los Mochos (33,9 %), partido de General Paz; y
- sur (S): Serie San Isidro (24,72 %), partido de San Cayetano.

Con respecto a la saturación potásica, hay una adecuada suficiencia en toda la provincia con valores generales de 5-15 %, y a su vez, se observan algunos partidos con valores aún mayores, alcanzando entre 15-28 %. Por último, la saturación con Mg^{+2} se encuentra con valores predominantes entre 12-43 % en la provincia, aunque en ciertos partidos del norte (N), centro (C) y sur (S) se hallan valores entre 6-12 %.

En los Mapas 2 y 3 se muestran la disponibilidad de cada catión en $kg\ ha^{-1}$, en las unidades cartográficas de suelos y el contenido medio para cada partido.



Mapa 2. Disponibilidad de las bases en las unidades cartográficas ($kg\ ha^{-1}$).



Mapa 3. Disponibilidad media por partido de los nutrientes básicos ($kg\ ha^{-1}$).

Se analizaron los datos analíticos del horizonte superficial de 217 series de suelos presentes en la provincia, los valores mínimos y máximos obtenidos de los cationes básicos, en mg kg^{-1} de suelo, fueron de 380 a 6560 para Ca^{+2} , de 61 a 2077 para Mg^{+2} y de 97 a 1838 de K^+ . Los valores de K^+ y Mg^{+2} superan los umbrales críticos de 150-175 mg kg^{-1} y 50-60 mg kg^{-1} respectivamente (Correndo y García, 2011); donde la disponibilidad de ambos es alta a muy alta como fue observado por Conti y García (2006), por lo cual no serían limitantes para la producción en cuanto a su disponibilidad. Los valores de potasio son dos a tres veces mayores que el umbral de respuesta, esto se explica porque los suelos pampeanos son derivados de loess muy ricos en K^+ . Por el contrario, se observan valores bajos en el contenido de Ca^{+2} . Lo expresado precedentemente está en concordancia con lo observado por Sainz Rozas et al. (2014) con respecto a la disponibilidad de las bases en la provincia.

Las disponibilidades de los nutrientes básicos expresados en kg ha^{-1} se muestran en el Mapa 2. Los contenidos de Ca^{+2} son superiores a los demás y los de Mg^{+2} son los menores. Los valores mínimos y máximos de disponibilidad expresados en kg ha^{-1} de suelo son:

- Ca^{+2} : Serie Chelforo (1190), partido de General Guido, y Serie La Alianza (22.400), partido de Balcarce;
- Mg^{+2} : Serie Laboulaye (190), partido de Villegas, y Serie Pueblitos (4.102), partido de 25 de Mayo;
- K^+ : Serie Paraje Arenas Verdes (383), partido de Monte Hermoso, y Serie Estación González Moreno (10.970), partido de Pellegrini.

La disponibilidad cálcica es baja hacia el NO, C y E de la provincia; pero presenta valores medios de entre 5.000 a 12.000 kg ha^{-1} de manera frecuente. Con ello, se pone de manifiesto la deficiencia de este nutriente de forma generalizada en gran parte de la provincia, coincidiendo con lo mencionado por Sainz Rozas et al. (2014) con respecto a los bajos valores de Ca^{+2} en condiciones originales en el NO de la provincia, lo que se esparció arealmente a causa del uso. En tanto que tiene sus valores máximos de disponibilidad en el N-NE de la provincia, como así también en

algunos lugares del C y S. En cuanto al Mg^{+2} la menor disponibilidad se concentra en el C-O, en tanto que las máximas se ubican hacia el S y N. Por último, el K^+ tiene disponibilidades entre 2.000 a 5.000 $kg\ ha^{-1}$ en casi toda la provincia, sin embargo, presenta las más bajas en el SO, E y NO. Por el contrario, las más altas se encuentran en el C-E de la provincia.

La disponibilidad media por partido está representada en el Mapa 3, donde se observa que los valores más altos de Ca^{+2} se encuentran en el N, en los partidos de Chacabuco, Chivilcoy, Salto, Ramallo, etc., alcanzando valores de entre 9.000 a 11.800 $kg\ ha^{-1}$; y los más bajos en el E y NO correspondiendo a Gral. Villegas, Carlos Tejedor, Dolores, Gral. Lavalle, etc., con disponibilidades que oscilan entre 1800 y 5000 $kg\ ha^{-1}$. En cuanto al Mg^{+2} las disponibilidades más altas se ubican en el C-N de la provincia, en los partidos de Chacabuco, Suipacha, Mercedes y Chivilcoy, como así también al S en las ciudades de Tandil y General Alvarado, con valores comprendidos entre 1.500 y 1.800 $kg\ ha^{-1}$; en cambio, los valores inferiores, menores a 500 $kg\ ha^{-1}$ se ubican hacia el SO, en los partidos de Puán, Tornquist y Bahía Blanca; aunque se observan valores intermedios, comprendidos entre 500 y 1.000 $kg\ ha^{-1}$ que se dan en gran parte de la provincia, en el C, E y O de la misma, e incluyen los partidos de Pehuajó, Trenque Lauquen, Tejedor, Saladillo, 25 de Mayo, Chascomús, Dolores, etc.. Por último, en lo referido al K^{+1} , se observan las máximas disponibilidades en los partidos de Monte y Rivadavia, ubicados en el E y O respectivamente, con valores de 3500 a 4396 $kg\ ha^{-1}$; mientras que las mínimas se sitúan al E, NO y SO de la provincia, en las ciudades de Castelli, Dolores, General Guido, Gonzales Chavez, Puan, Alsina, Tejedor, Villegas, etc., con valores que van de 817 a 2000 $kg\ ha^{-1}$.

Análisis de estimaciones agrícolas

En la figura 1 se visualiza la evolución del rendimiento de los 4 cultivos (trigo, soja, maíz y girasol) desde la campaña de 1969/70 hasta la del año 2015/16.

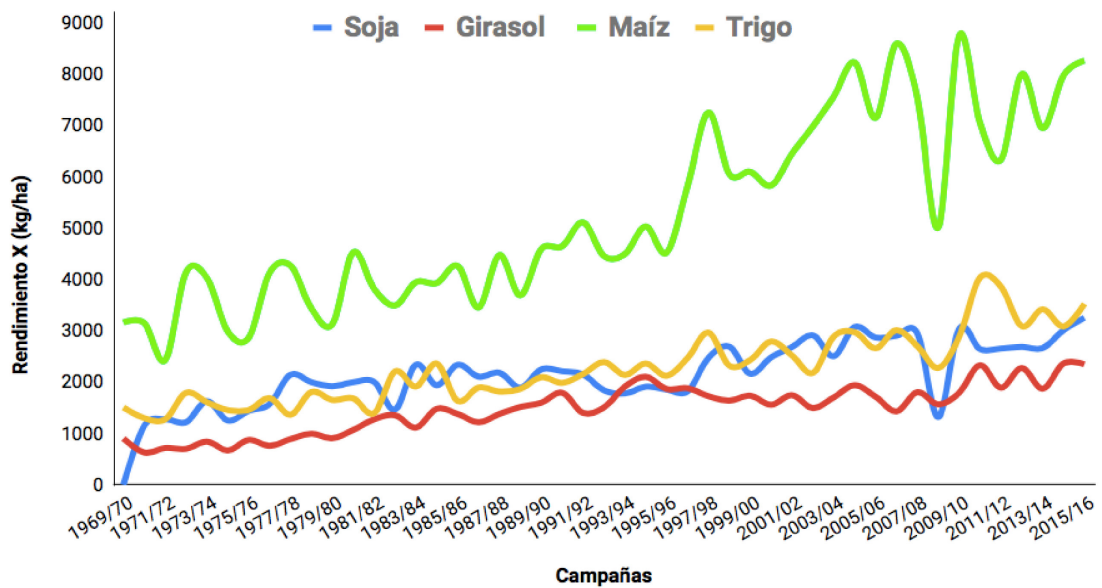


Figura 1. Rendimientos ($kg\ ha^{-1}$) de los 4 principales cultivos agrícolas (trigo, soja, maíz y girasol) durante las campañas 1969/70 - 2015/16.

En las figuras 2 y 3 se visualiza la evolución de la superficie cosechada total en hectáreas (ha) y de la producción total en toneladas (t) de los 4 principales cultivos agrícolas de manera conjunta en el periodo comprendido entre 1969/70 y 2015/16.

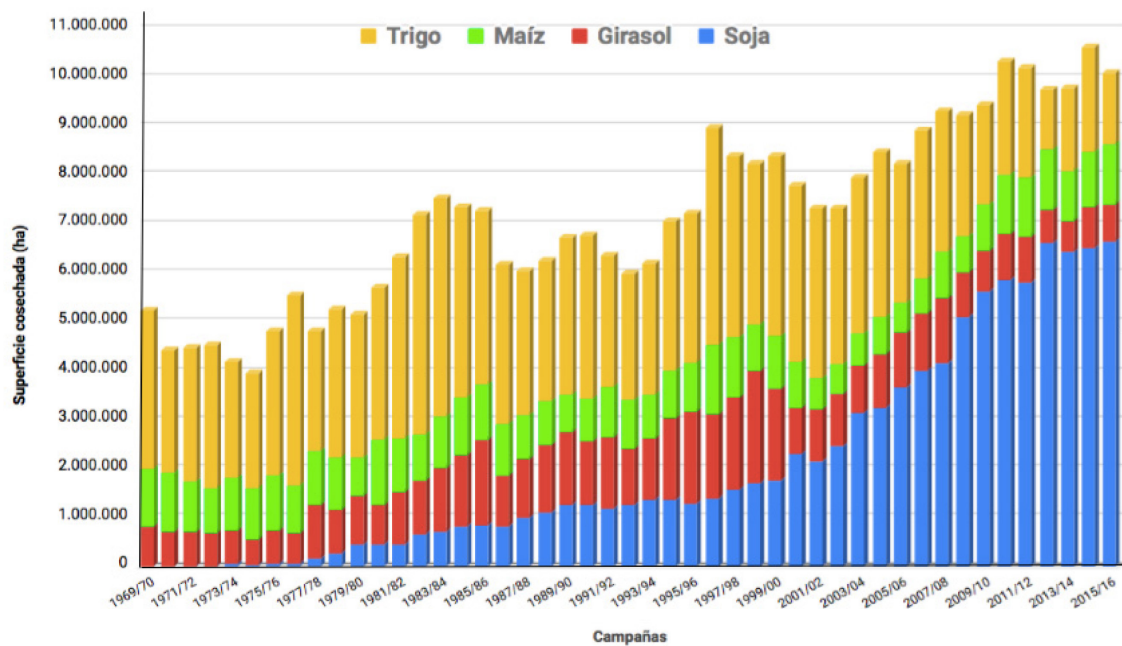


Figura Nº 2. Variación de la superficie cosechada total (ha) de los 4 cultivos agrícolas.

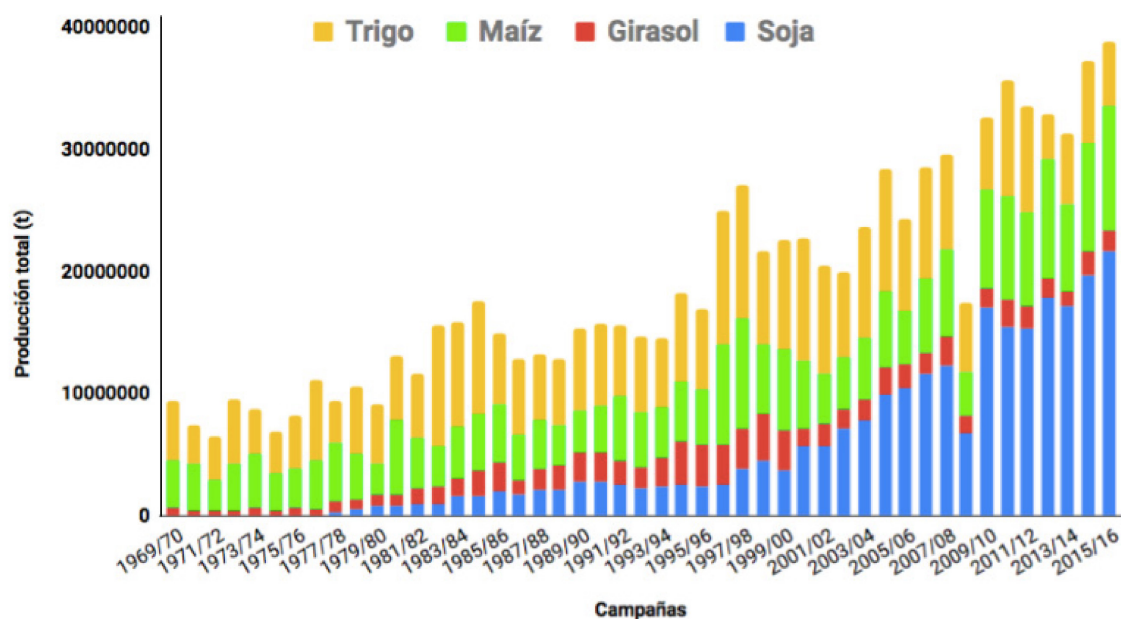


Figura 3: Variación de la producción total (Tn) de los 4 cultivos agrícolas.

En la figura 4 se visualiza la superficie cosechada de cada cultivo al inicio, a la mitad y al final del período analizado y su representatividad porcentual respecto al total de la superficie cosechada.

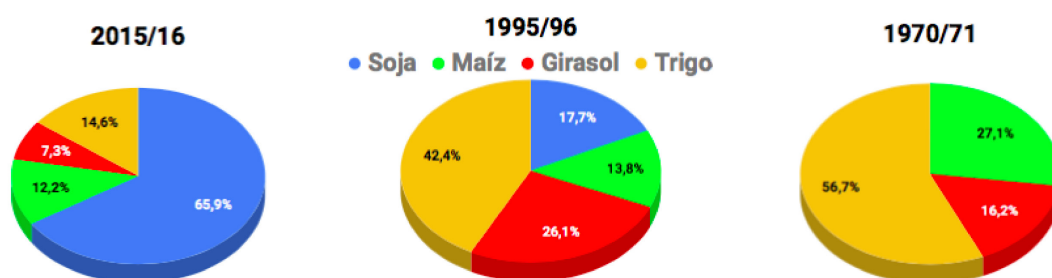


Figura 4: Superficie cosechada en % de cada cultivo en la campaña de 2015/16, 1995/96 y en 1970/71.

La superficie cosechada total y la producción de los principales cultivos agrícolas de la provincia de Buenos Aires (trigo, maíz, soja y girasol), se incrementaron en forma vigorosa en los últimos 20 años, en coincidencia con la gran expansión que tuvo el cultivo de soja, lo que pone en evidencia lo analizado por

Cruzate & Casas, (2009) y por Manchado (2010). Desde 1969 y hasta mediados de la década del '90, el área agrícola cultivada con dichos cultivos agrícolas osciló alrededor de las 6 millones de ha mientras que la producción se mantuvo alrededor de los 13 millones de Tn, con escasas variaciones a través de las campañas. A partir de mediados de los '90, el área cosechada y la producción en la provincia de Buenos Aires crecieron de manera acelerada, abarcando más de 10 millones de ha cosechadas y más de 35 millones de Tn producidas en la campaña 2015/16 (figura 2 y 3), lo que se debe particularmente a la expansión del cultivo de soja, tal como mencionaba Michelena et al. (2010). La tasa de crecimiento de la superficie cosechada con este cultivo, de muy poca importancia en el país hasta comienzos de los '70 (1.390 ha en 1971), tuvo un escaso crecimiento desde esa década hasta mediados de los '90 a partir de dónde se aceleró de manera vertiginosa (figura 2). En 2015/16, el área cultivada con soja en la provincia representó más de 6,5 millones de ha. Las diferentes causas de esta expansión, además de la aptitud de gran parte de los suelos de la región para este cultivo, deben hallarse en los precios de este *commodity* en el mercado internacional, altos rendimientos de las variedades modificadas genéticamente (OGM), tiempos cortos de rotación (doble cultivo trigo/soja), fácil control de malezas y los bajos costos relativos de labranza al utilizar siembra directa (Strada & Vila, 2016).

La producción de trigo y girasol disminuyó, mientras que el cultivo del maíz aumentó, como resultado del incremento en su rendimiento (figura 3). Esta variación se pone de manifiesto al observar como en las primeras campañas de la década del 70' el rendimiento oscilaba entre los 3.000-4.000 kg ha⁻¹, mientras que en la actualidad, se obtienen rendimientos promedios de 8.000 kg ha⁻¹ (figura 1).

Es importante remarcar, que la depresión en los rendimientos, superficie cosechada y producción observada en el año 2008, fue debido a la sequía ocurrida en

dicho año, donde hubo pérdidas de 4.971 millones de dólares, según estimaciones de Matías Lestani, de Confederaciones Rurales Argentinas -CRA- (2008).

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, observamos que la soja para la campaña de 1970/71 representaba menos 0,05 % del total de la superficie cosechada de los cuatro cultivos en la provincia, en la del 1995/96 18 %, mientras que para la del año 2015/16 era del 66 % (figura 4), lo que demuestra su supremacía con respecto a los demás cultivos.

Huella Mineral. Extracción de nutrientes.

En las figuras 5 y 6 se visualiza la extracción total (Tn) por cada cultivo, de cada una de las bases; y las extracciones de cada base en porcentaje (%) según cada cultivo durante el período considerado 1969/70 - 2015/16.

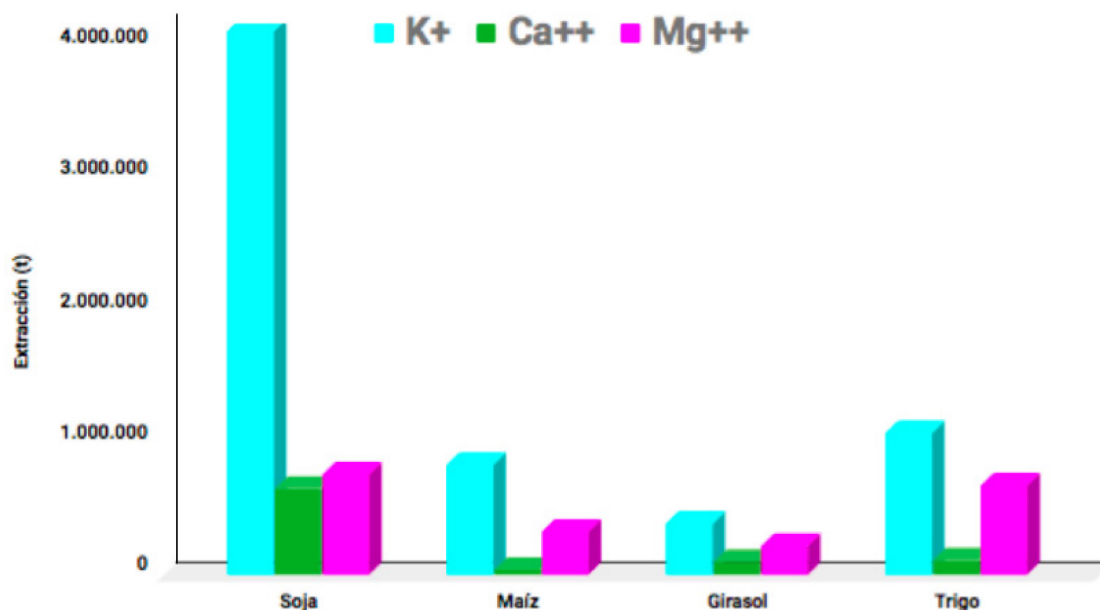


Figura 5. Extracción en toneladas (Tn) de cada una de las bases según cada cultivo.

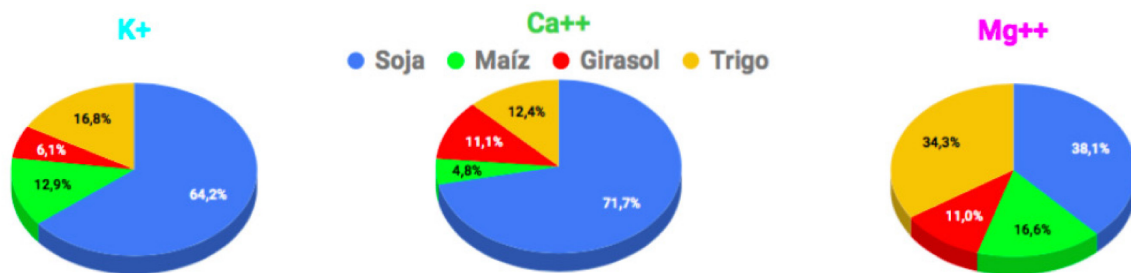


Figura 6: Extracción del Mg⁺², Ca⁺² y K⁺¹ por cada uno de los cultivos durante el período 1969/70 - 2015/16.

En la figura 7 se visualiza la extracción en porcentaje del total de las bases que corresponden a cada cultivo (trigo, girasol, maíz y soja) y el porcentaje de cada base extraída con respecto al total extraído, en el período 1969/70 al 2015/16.

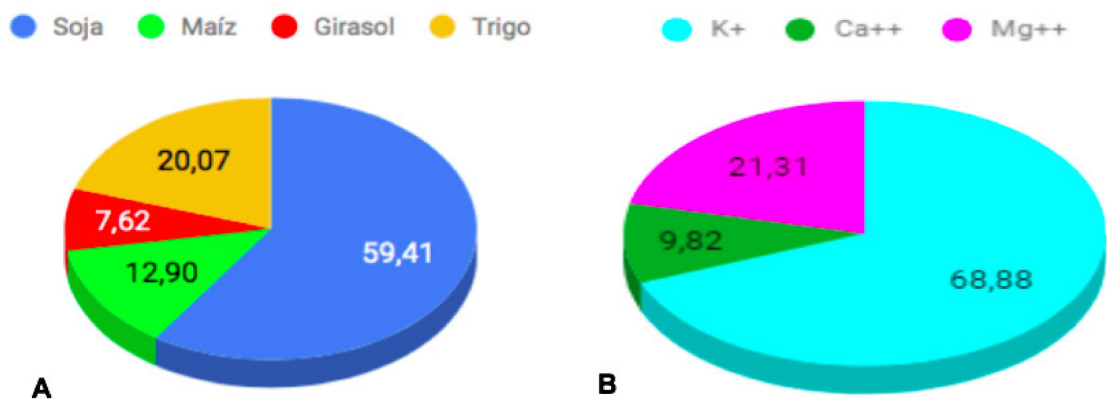


Figura 7. Extracción porcentual de las bases extraídas según cada cultivo agrícola (A); y extracción porcentual de la totalidad de las bases (B).

En las figuras 8 y 9 se visualiza la “Huella Mineral” en kg ha⁻¹ y en toneladas (Tn) durante el período 1969/70 - 2015/16.

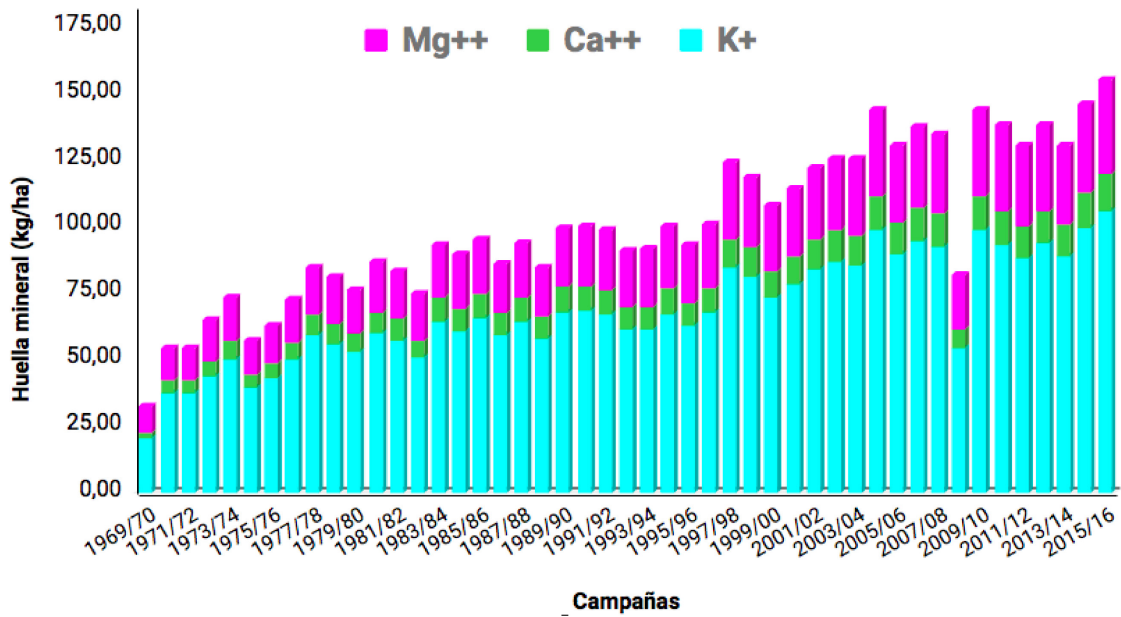


Figura 8: Huella mineral en $kg\ ha^{-1}$ de todos los cultivos durante cada campaña.

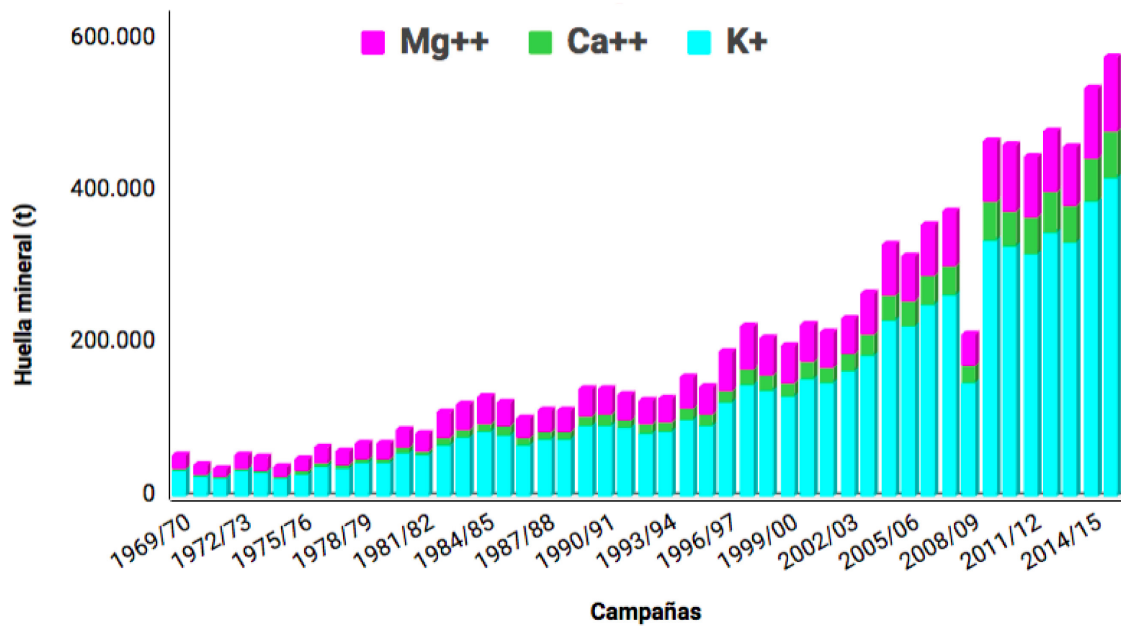


Figura 9: Huella mineral en Tn durante cada campaña.

En la figura 10 se visualiza la extracción total en toneladas (Tn) y en % década por década, durante el período 1969/70 - 2015/16.

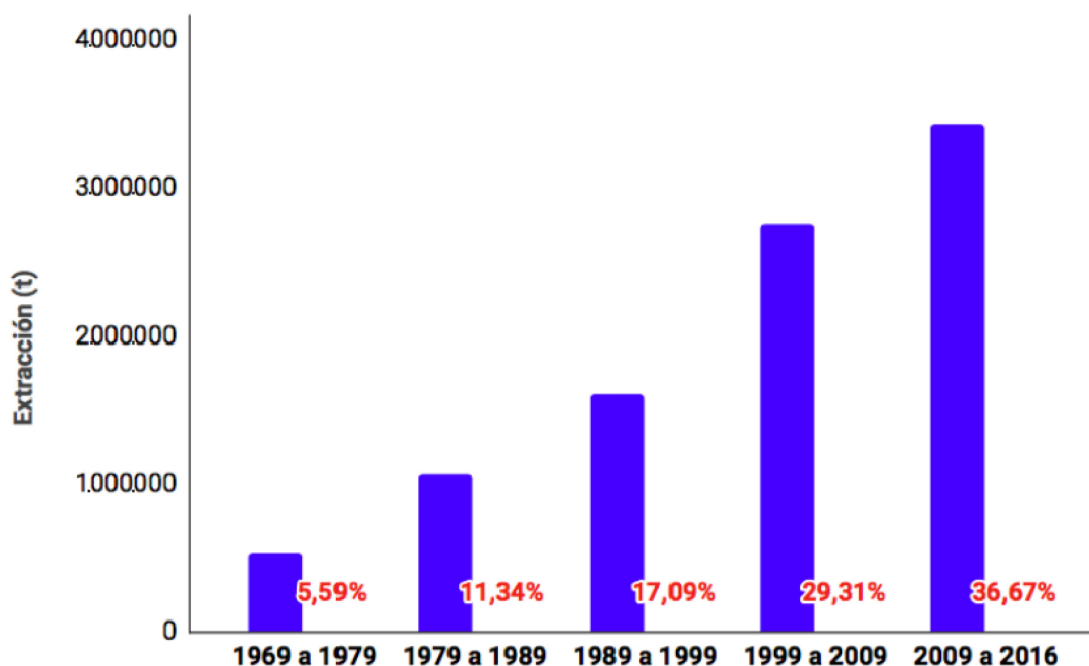


Figura 10: Extracción total de bases en cada década.

La tasa de extracción de nutrientes es variable de acuerdo al cultivo realizado y al rendimiento alcanzado. La extracción en kg ha^{-1} “Huella mineral” se incrementó progresivamente a lo largo de los años de la mano del incremento en los rendimientos (figura 8), mientras que la extracción total (en Tn) se incrementó exponencialmente a lo largo de las campañas, llegando a extraer en la campaña 2015/16 un total de 577.135 Tn de nutrientes básicos (figura 9).

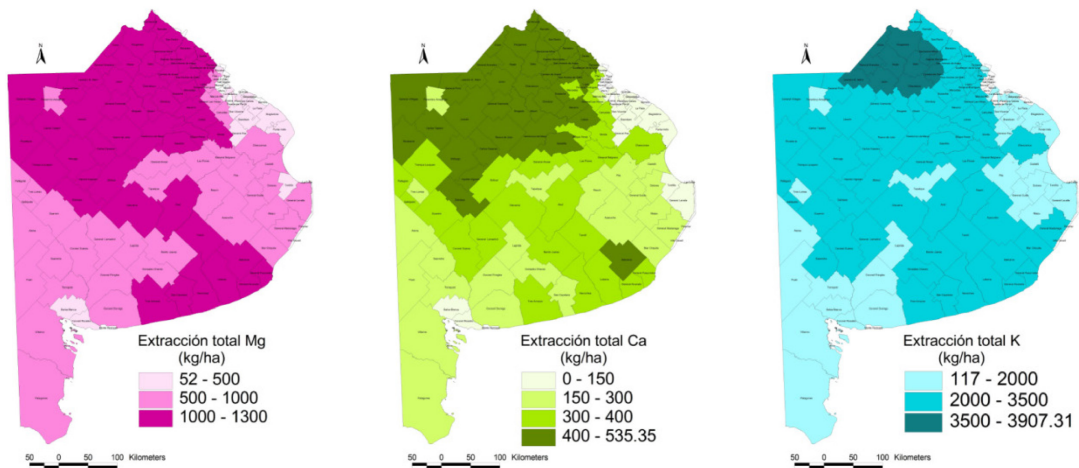
Los resultados indican que se extrajeron 9,36 millones de Tn de nutrientes básicos, en las 47 campañas por los cuatro cultivos, correspondiendo un 10 % al Ca^{2+} , 21 % al Mg^{2+} y 69 % para el K^+ (figura 7B), donde a su vez, la extracción de K^+ fue mucho mayor que la del Ca^{2+} y Mg^{2+} en todos los cultivos, y particularmente en la soja, donde se extrajo seis veces más K^+ que Ca^{2+} y cinco veces y media más K^+ que Mg^{2+} (figura 5).

Similar proporción se observa en cada década, aunque los valores absolutos se van incrementando; en la primera década se extrajo el 5,6 % de ese total

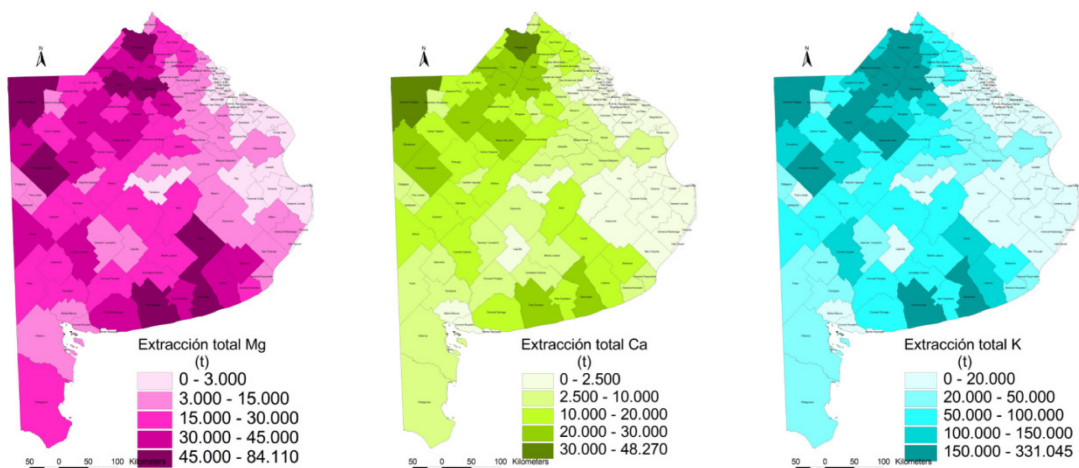
correspondiente a 522.908 Tn, mientras que en la última (período de 7 años) la misma representa el 36,7 % lo que equivale a 3.431.564 Tn extraídas, esto se explica por el aumento en los rendimientos y por el aumento de la superficie dedicada a la agricultura extensiva (figura 10).

En cuanto a los cultivos, la soja, en todos los periodos, excepto en el primero (1969-1979), fue la que mayor HM total tuvo, llegando a provocar la extracción del 72 % del Ca^{2+} (un total de 658.642 Tn), 64 % del K^+ (4.140.347 Tn) y el 38 % del Mg^{2+} (760.472 Tn) del total extraído por todos cultivos en todo el período analizado, lo que equivale a un total de 5.559.461 Tn totales o 2.326,14 kg ha^{-1} (figura 5 y 6). Por lo cual, la soja ha extraído el 60 % del total de las bases durante todo el período analizado, lo que se fundamenta en sus altos requerimientos en dichos cationes, ya que según el IPNI requiere 39 kg K^+ por Tn de grano, 16 kg Tn^{-1} de Ca^{+2} y 9 kg Tn^{-1} de Mg^{+2} , con índices de cosecha de 0,5, 0,2 y 0,4 respectivamente, por lo cual es mucho más extractiva que el resto de los cultivos. Luego de esta leguminosa, en el orden de extracción, lo sigue el trigo con el 20 %, el maíz con 13 %, mientras que el girasol es el que menos participación tuvo, solo con un 8 % del total (figura 7A).

En los Mapas 4 y 5 se observan las distintas escalas de extracción total de los nutrientes básicos expresadas en kilogramos por hectárea (kg ha^{-1}) y en toneladas (Tn), de cada una de las bases según cada partido en toda la provincia de Buenos Aires, en todo el período analizado.



Mapa 4. Extracción total en kg ha^{-1} de los nutrientes básicos, ocasionados por los cuatro cultivos en las 47 campañas.



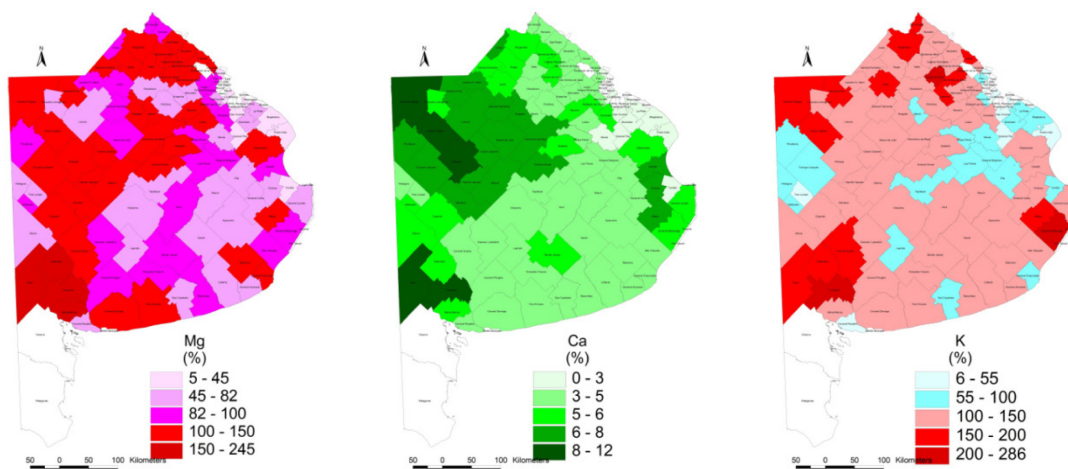
Mapa 5. Extracción total (T_n) de nutrientes básicos por partidos, para los cuatro cultivos y todas las campañas.

Las tasas máximas de extracción en kg ha^{-1} se registraron en los partidos del N de la provincia para las tres bases (aunque el Mg^{+2} también se extrajo en igual cantidad en el C y S de la provincia); mientras que las mínimas en el E, donde se contabilizaron valores máximos de más de 400 kg ha^{-1} de Ca^{+2} , 1.000 de Mg^{+2} y 3.500

de K^{+1} ; en tanto que los valores mínimos fueron de menos de 150 kg ha^{-1} de Ca^{+2} , 500 de Mg^{+2} y 2.000 de K^{+1} en las 47 campañas, tal como observamos en el Mapa 4.

Las mayores extracciones en toneladas de los tres nutrientes, como se vislumbra en el Mapa 5, se produjeron en los partidos del N y en algunos del S de la provincia; mientras que las menores se registraron hacia el E. La mayor extracción del Ca^{+2} para todas las campañas se dió en los partidos de Pergamino y General Villegas, ubicados en el N y NO de la provincia respectivamente, con valores de entre 30.000 y 48.000 Tn; en tanto que los menores se hallaron principalmente hacia el E de la provincia en partidos como Magdalena, Castelli, Pila, Ayacucho, etc., como así también en partidos más del centro como Laprida y Tapalqué, con valores menores a 2500 Tn. En cuanto al K^{+} las máximas extracciones fueron en el NO y en el S de la provincia, en partidos como Tres Arroyos, Necochea, Villegas, Junín, Chacabuco, con valores entre 150.000 y 331.000 Tn extraídas; mientras que las menores extracciones se dieron en la mayoría de los partidos del E, como Castelli, Dolores, Brandsen, Cañuelas, etc. con valores menores a 20.000 Tn. Por último, el Mg^{+2} tuvo las máximas tasas de extracción en el N, NO y S de la provincia, en las ciudades de Tandil, Necochea, Tres Arroyos, Trenque Lauquen, Villegas, Junín, Chacabuco y Pergamino, con valores de 45.000 a 84.000 Tn extraídas; en cambio las extracciones mínimas se registraron al E de la provincia, por ejemplo en General Paz, Castelli, Brandsen, etc., con valores menores a 3.000 Tn.

Mapas de Susceptibilidad



Mapa 6. Mapas de Susceptibilidad en %, según la extracción total en kg ha^{-1} (4 cultivos en las 47 campañas) respecto de la disponibilidad inicial en kg ha^{-1} media por partido.

En el Mapa 6 se resaltan los partidos de la provincia con altos niveles de susceptibilidad a la acidificación, evaluado a través de la relación porcentual entre la HM (kg ha^{-1}) respecto a la disponibilidad inicial de nutrientes básicos reportados en las Cartas de Suelos relevadas. Se observa que las zonas más susceptibles a tener problemas de acidez se ubican en el NO y SO con respecto al K^+ y al Ca^{+2} (Carlos Tejedor, Gral Villegas, Pehuajó y Puan), aunque también hay, en el caso del K^{+1} partidos susceptibles hacia el SE (Maipú y Madariaga) y en el N (Pergamino y San Nicolás). En cuanto al Mg^{+2} la susceptibilidad a la acidificación se presenta en forma generalizada en toda la provincia, aunque los partidos del SO son potencialmente más susceptibles (Saavedra, Puán, Tornquist y Bahía Blanca).

Cabe aclarar que en este análisis asumimos que la disponibilidad inicial de bases no se vio alterada, ni por aportes naturales (solubilización, meteorización, mineralización) o artificiales (abonos sintéticos u orgánicos) ni por pérdidas naturales (erosión, lixiviación, lavado). Solamente se cuantificó la extracción por las cosechas de los granos.

En las áreas de mayor susceptibilidad sería necesario considerar tanto la reposición de los mismos a través de fertilizantes y/o enmiendas como así también un replanteo de las rotaciones para mejorar el balance de las bases y con ello la sustentabilidad del recurso suelo.

Analizando las bases individualmente, se observa que el Ca^{+2} se extrajo como máximo el 12 % del disponible inicialmente, mientras que el K^{+1} y el Mg^{+2} exceden el 100 %.

CONCLUSIÓN

Considerando que la dominancia actual de la soja está determinada sobre un área total cultivada que es la mayor en la historia, se podría concluir que ningún otro cultivo ha sido tan relevante en la agricultura bonaerense.

Si se tiene en cuenta que dicha leguminosa es el cultivo que tuvo mayor huella mineral, como consecuencia de ser el más extractivo de cationes y el de mayor superficie cosechada, claramente estaría en peligro la sustentabilidad del modelo productivo que se viene imponiendo en los últimos años, lo que acentuaría la problemática de acidificación a largo plazo, por disminución de la capacidad de resiliencia de los suelos bonaerenses.

Ello se refleja en los resultados obtenidos, donde de los 9,36 millones de Tn de bases extraídas en las 47 campañas, el 59,4 % fue debido a dicha especie.

En cuanto a la saturación relativa de bases, hay una deficiencia de calcio en gran parte de la provincia, no así con el resto de las bases; mientras que la saturación total se encuentra en niveles adecuados en toda la provincia.

Si bien la disponibilidad absoluta actual de K^{+} es elevada, su disponibilidad relativa a Ca^{+2} y Mg^{+2} podría ser limitante en ciertas zonas de la provincia de Buenos Aires.

La actividad agrícola disminuyó en promedio un 23,5 % el K^+ intercambiable, valor que supera al determinado para Ca^{+2} y Mg^{+2} , lo que se explicaría por la mayor exportación en los granos de K^+ respecto a Ca^{+2} y Mg^{+2} . Por lo cual, pese a las mayores extracciones en K^+ y Mg^{+2} , (69 % y 21 % del total respectivamente) no serían limitantes para la producción agropecuaria. Las mayores tasas de extracción en toneladas de los tres nutrientes, se produjeron mayoritariamente en los partidos del norte y en algunos del sur de la provincia; mientras que los menores tasas se registraron hacia el este, por lo cual sería esperable hallar los menores valores de pH hacia norte de la provincia, en la zona núcleo agrícola, lo que es debido a la mayor continuidad de la agricultura que tuvo dicha región.

Por lo cual, para lograr un incremento en la productividad y la producción agrícola, como así también evitar la degradación de los suelos, resulta imprescindible incrementar la tasa de reposición de nutrientes apuntando a lograr un balance más equilibrado.

Por lo tanto, frente a esta problemática, las mejores prácticas de manejo de la fertilización deben integrarse a un programa de aplicación de buenas prácticas de manejo agronómico tales como rotación de cultivos, siembra directa, cultivos de cobertura, manejo de integrado de plagas y enfermedades y agricultura por ambientes, entre otras herramientas, contribuyendo significativamente a preservar y mejorar la calidad del recurso suelo, produciendo de una forma sustentable, por lo que es fundamental una política agropecuaria acorde a las necesidades imperantes.

BIBLIOGRAFÍA

- **Abbona, E., M. Presutti, M. Vázquez & S. J. Sarandón.** 2016. Los sistemas de producción de carne y leche bovina en la Provincia de Buenos Aires ¿conservan los nutrientes del suelo?. Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata (2016) Vol 115 (2): 251-263
- **Consultora Economía & Regiones.** 2017. Informe sobre la región pampeana. <http://www.economiayregiones.com.ar/suscripciones/informes-economias-regionales/505-origen-provincial-de-las-exportaciones-ano-2016>
- **Conti, M., & F.O. García.** 2006. Potasio. En: Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos (eds. HE Echeverría y FO García). Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina. p. 123-137.
- **Correndo Adrián & García Fernando.** 2011. Alternativas de diagnóstico para el manejo nutricional en cultivos extensivos.VI Congreso boliviano de la Ciencia del Suelo. Noviembre 2011, Sucre, Bolivia.
- **Cruzate, Gustavo Adolfo & Casas, Roberto R.** 2009. Extracción de nutrientes en la Agricultura Argentina . Instituto de suelos , CIRN, INTA. Publicado en Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica- IPNI.
- **Gambaudo S & H. Fontanetto.** 2011. Diagnóstico de la acidez edáfica y su corrección. Simposio de Fertilidad 2011.
- **García, Mirta G y Presutti, Miriam.** 2018. Extracción de bases del modelo productivo, en los suelos de la provincia de Buenos Aires. XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. San Miguel de Tucumán - 15 al 18 Mayo 2018.
- **Gelati P. y M. Vázquez.** 2007. Exportación agrícola de nutrientes básicos en la zona norte de la Provincia de Buenos Aires y el costo de su remediación. Acta Segundas Jornadas de la Asociación Argentino Uruguaya de Economía Ecológica (ASAUEE), 12-13/11, Luján, Argentina. p. 28-29

- **Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale, and W.L. Nelson.** 1999. Soil Fertility and Fertilizers. 6th Edition. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ. 499 p.
- **Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale, y W.L. Nelson.** 2005. Soil acidity and alkalinity. En J.L. Havlin, J.D. Beaton, S.L. Tisdale, W.L. Nelson (ed.) Soil fertility and fertilizers. Pearson Prentice Hall. New Jersey. 7th ed, p. 45-96.
- **INTA (Instituto Nacional de Tecnología agropecuaria).** 1989. Degradación de los Suelos en el Norte de la Región Pampeana. Publicación Técnica No 6. Proyecto de Agricultura Conservacionista, 1989.
- **IPNI (International Plant Nutrition Institute).** 2016. Planilla de cálculos de requerimientos nutricionales.
- **Lestani, Matías.** 2008. Departamento económico de Confederaciones Rurales Argentinas (CRA). Revista AgroVerdad. Impacto de la sequía: comparación con la de 2008/2009.
<https://agroverdad.com.ar/2018/02/impacto-la-sequia-comparacion-la-20082009-perdidas-87-000-millones>
- **Manchado, Juan Carlos.** 2010. EEA INTA Balcarce. Valoración económica del balance de nutrientes para las principales actividades agropecuarias extensivas en la Región Centro Sur de la Provincia de Buenos Aires.
- **Mengel K. & Kirkby E.A.** 2000. Principios de Nutrición Vegetal. Ed. Instituto Internacional de la Potasa, Basilea Suiza. 4ta Ed. 1ra Ed. en español. 6'7 p.
- **Michelena, Roberto, Eiza, Maximiliano y Carfagno, Patricia.** 2010. Los suelos, la soja y la agriculturización . Instituto de Suelos. CIRN -INTA.
https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_los_suelos_la_soja_y_la_agriculturizacin.pdf
- **Porta, J., M.López-Acevedo y C. Roquero.** 1994. Edafología para la agricultura y el medioambiente. Ed. Mundi-Prensa. 807 pág.
- **Pellegrini, Andrea Edith.** 2014. Potasio, magnesio y calcio del suelo. Apunte

edafología. UNLP.

- **Rimatori, Fernando.** 2018. Comunicación personal. Grupo Suelos - EEA INTA Pergamino. rimatori.fernando@inta.gob.ar

- **Sainz Rozas, H., Eyherabide, M., & Barbieri, P.** 2014. ¿Cuál es el estado de la fertilidad de los suelos argentinos? EEA INTA Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

- **Strada, Julia & Vila, Ignacio Andrés.** 2016. La producción de soja en Argentina: causas e impactos de su expansión. Estudios de Economía Política y Sistema Mundial.

<http://www.centrocultural.coop/revista/23/la-produccion-de-soja-en-argentina-causas-e-impactos-de-su-expansion>

- **Vázquez, Mabel.** 2005. Calcio y Magnesio. Acidez y alcalinidad de los suelos. En Echeverría, H.; García, F. (eds). Fertilidad de los suelos y fertilización de cultivos . INTA. Buenos Aires, Argentina.

- **Vázquez, Mabel.** 2014. Pérdida de nutrientes básicos, sus consecuencias y posibilidades de tratamiento. FCAYF - UNLP (Argentina). Presentado en el XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. <https://www.engormix.com/agricultura/articulos/perdida-nutrientes-basicos-sus-t31530.htm>

- **Vázquez M. & A. Pagani A.** 2015. Calcio y Magnesio del suelo. Manejo de fertilización y enmiendas. En: Echeverría H., García F. (Ed.). Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. INTA, Cap. 11: 317-356.

- **Vicente, Guillermo & Engler, Patricia.** 2011. Huella mineral, Índice de eficiencia de exportación mineral y Relación real de intercambio de nutrientes en la producción agrícola pampeana. V Congreso Iberoamericano sobre Desarrollo y Ambiente de REDIBEC (V CISDA). V Jornadas de la Asociación Argentino Uruguay de Economía Ecológica. Santa Fe, Argentina. 12-14 de Septiembre de 2011.