

UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Instituto Universitario de Xeoloxía

EVALUACIÓN DEL ESTADO NUTRICIONAL
DEL CULTIVO DE SOJA EN ARGENTINA UTILIZANDO ANÁLISIS FOLIARES

Tesis Doctoral



Edgardo Santiago Arévalo

Mayo 2015

EDGARDO
SANTIAGO
ARÉVALO

2015



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Instituto Universitario de Xeoloxía

Tesis Doctoral



Edgardo Santiago Arévalo

Mayo 2015



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Instituto Universitario de Xeoloxía

Tesis Doctoral

EVALUACIÓN DEL ESTADO NUTRICIONAL DEL CULTIVO DE SOJA EN ARGENTINA UTILIZANDO ANÁLISIS FOLIARES

Edgardo Santiago Arévalo

Mayo 2015



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

D. César Eugenio QUINTERO, Profesor Titular de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Entre Ríos (UNER), Argentina; **Dña. Eva VIDAL VÁZQUEZ** Profesora Contratada Doctora del Área de Edafología y Química Agrícola de la Universidade da Coruña (UDC) y **D. Jorge PAZ FERREIRO**, Profesor Contratado en la School of Civil, Environmental and Chemical Engineering del Royal Melbourne Institute of Technology (RMIT) University, Australia.

CERTIFICAN:

Que la presente Memoria titulada “***Evaluación del estado nutricional del cultivo de soja en Argentina utilizando análisis foliares***” que para optar al grado de Doctor por la Universidade da Coruña presenta **D. Edgardo Santiago ARÉVALO**, ha sido realizada bajo nuestra dirección y supervisión dentro del Programa Oficial de Doctorado *Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente* de la UDC.

Considerando que constituye trabajo de *Tesis Doctoral*, autorizamos su presentación.

Y para que así conste, firmamos el presente certificado en A Coruña, a 8 de Abril de 2015

Fdo.: César Eugenio Quintero

Fdo.: Eva Vidal Vázquez

Fdo.: Jorge Paz Ferreiro

Dedicada a mis Padres Irma y Alberto

A mis hijos Santiago, Joaquín, Mario y su madre Lorena

AGRADECIMIENTOS

Esta es la culminación de una de las etapas de mi carrera de formación más soñada de mi vida, desde los siete años cuando concurrí por primera vez a la escuela Agrotécnica Justo José De Urquiza, donde estudiaba mi hermano Carlos. Ahí pude ver y escuchar al primer Ingeniero Agrónomo, Guillermo Almeida; fue ese día, que decidí lo que quería ser o empecé con el sueño de ser lo que soy. Al culminar la escuela primaria, fui a esta escuela, donde me gradué de Agrónomo en 1989. Luego de pasar por el servicio militar durante los años 1989 y 1990, emprendí el sueño de estudiar Ingeniería Agronómica. Esto no era fácil, ya que la Facultad Ciencias Agropecuarias se encuentra a 160 km de donde vivía, en Oro Verde, Paraná. No era para mí fácil en lo económico pero mi madre y mi padrino me habían enseñado desde muy chico, que en la vida todo se puede lograr y vaya si tenían razón.

Quiero agradecer, a mis profesores de la Escuela Agrotécnica Justo José de Urquiza, por enseñarme y transmitirme el entusiasmo de las ciencias y la Agronomía. A los ingenieros Guillermo Almeida, Mario Secchi, Carlos Kohon, Malena Lesca, Alberto Kohon y a todos los integrantes de esta institución a la cual estoy muy agradecido.

Al Instituto Autárquico Becario de la provincia de Entre Ríos y al entonces Diputado Carlos Roberto Fuertes, por la ayuda en la obtención de las becas que tuve durante cinco años de mi carrera.

A mis amigos de la infancia, Hugo Bodino, Dante Torreta, Mario Wilvers, la Auto Peña 35, por la ayuda que tal vez sin darse cuenta me daban cuando preguntaban cómo me iba en la facultad o compartíamos un fin de semana de auto de carrera y asado. A Raúl Challioll, por enseñarme y apoyarme en todo momento.

A mis hermanos, Rubén y Carlos, mis cuñadas Patricia Villo y María Luisa Acosta, y mis sobrinos Tobías, Lázaro, Ismael y Silvina.

A la Facultad de Ciencias Agropecuarias, por su cálida bienvenida y al enorme grupo de personas que encontré, que se fueron transformando en amigos, sostén para alcanzar los objetivos. A José Dietrich, Andrea Guerrero y Luciano Buxman por todos los momentos vividos, en los seis años de cantina.

A mi inspirador de cursado el Dr. René Benavidez, que facilitó la llegada al laboratorio de suelos y a la cátedra de Edafología, donde conocí al Ingeniero César Quintero, que tuve el gusto de haber tenido de director de mi tesis de grado y también ahora de codirector en esta tesis doctoral. A la Licenciada, Graciela Boschetti, por enseñarme cada técnica de laboratorio con una paciencia y docencia única. A los que ya no están físicamente, pero sí en mi recuerdo para siempre: al Geólogo Carlos Jorge José Vesco (Pancho) y el Licenciado Ricardo Valenti (Tano).

A todos los profesores de esta Institución mi agradecimiento en mayúsculas ya que de cada uno tomé ideas y conocimientos que hoy aplico en la vida profesional. A mis colegas de la Cátedra Cereales y Oleaginosas, Drs. Oscar Valentinuz, Octavio Caviglia y los ingenieros Andrea Lissaso, Analía del Porto, y Walter Kutel.

Otro inspirador en mi formación ha sido el Dr. Eduardo Díaz, que a partir del inicio de las relaciones con el Dr. Antonio Paz González y la invitación del Dr. César Quintero, a los cuales agradezco profundamente el apoyo en mi formación y el soporte financiero en la Universidad de La Coruña.

A la Ing. Romina Befani, por los análisis realizados y a todo el laboratorio de Tecnologías Aplicadas. A la Ing. Mónica Pérez por la ayuda brindada y el trabajo realizado para esta tesis.

A mis compañeros de casa, mi familia durante el cursado de la carrera, Máximo Leonel Itkin, Germán Colleti, Fernando Marchesse y Nicolas Spinelli.

Gracias al Ing. Jorge Schell, quien confió en mí cuando realicé el planteo de hacer este doctorado, ya que además de ser importante para mi formación podía contribuir con el desarrollo de la empresa que trabajo, COMPO Argentina, que también fue el soporte financiero para los análisis realizados, pasajes y días libres para estudio. A todo el equipo que participó del muestreo de lotes, Ing. Hugo Portal, Alfredo Pazzaglia y Walter Perez-Farhat.

A mi actual equipo de trabajo, Florencia Missart por la coordinación de envíos de las muestras, Diego Longobucco, Guillermo Fourcade, Juan Messineo, Jose Gao, Sergio Fettolini, Fabio Prats, Pablo Carro, Federico Viviani y Antonella Laperuta por el apoyo brindado en este proyecto y mis ausencias.

A todos, quienes de una u otra manera confían y me han ayudado en el desarrollo de mi carrera profesional.

A mi familia, por comprender y entender mis desafíos, ausencias en viajes, trabajo, pero quiero que sepan que todo lo he hecho por ellos.

RESUMEN

En esta tesis se analiza el estado nutricional del cultivo de soja en la zona núcleo argentina, a partir de análisis foliares. Para poder representar diferentes zonas productivas de esta región se realizaron muestreos en las provincias de Santa Fe, Córdoba y Buenos Aires, en el estadio de R1 (Inicio de floración); luego las muestras fueron secadas y analizados los nutrientes nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, azufre, magnesio, zinc, manganeso, cobre, hierro y boro.

A partir de los resultados obtenidos, se realizaron comparaciones con tablas internacionales de referencia y como se obtuvieron los rendimientos de cada lote, se ajustaron tablas a partir de esta base de datos.

Para poder determinar el estatus nutricional del cultivo, se utilizó el método DRIS, que analiza las relaciones de todos los nutrientes, generando normas de una sub población de altos rendimientos mayor a 3978 kg ha^{-1} , calculando los índices nutricionales para cada nutriente por el método propuesto por Jones 1981. Se determinó el orden de limitación por deficiencia y el índice de balance nutricional.

Con estos resultados se pudo evaluar el estatus nutricional por provincia, verificar los nutrientes más limitantes y predecir a partir del IBN, el rendimiento del cultivo.

El azufre fue el nutriente que limitó fuertemente la producción del cultivo en la zona núcleo, seguido por nitrógeno, potasio y magnesio. Entre los micronutrientes se encontraron a zinc y cobre como principales limitantes. Manganeso y calcio fueron los elementos que presentaron la mayor disponibilidad en valores óptimos o superiores.

La información generada, permitirá elaborar planes de nutrición más ajustados a los cultivos, con recomendaciones de nutrientes que hasta hoy no se utilizan. Además son el punto de partida para una mejor interpretación de la capacidad de cada suelo de proveer nutrientes, para la toma de decisiones de profesionales, productores y como método de enseñanza en las universidades.

RESUMO

Nesta tese analízase o estado nutricional da soia na zona de maior produtividade de Arxentina a partir da análise foliar da planta. Para representar diferentes áreas de produción desta rexión realizáronse mostraxes nas provincias de Santa Fe, Córdoba e Bos Aires, no estadio de R1 (inicio da floración). Posteriormente, as mostras foron secadas e analizouse o contido en nitróxeno, fósforo, potasio, calcio, xofre, magnesio, zinc, manganeso, cobre, ferro e boro.

Os resultados foron comparados cos valores das táboas internacionais de referencia. Ademais, como foron obtidos os rendimentos de cada lote, axustáronse as táboas a partir do banco de datos.

Para determinar o estado nutricional do cultivo, utilizouse o método DRIS, que analiza as relacións de todos os nutrientes, xerando normas dunha sub poboación de altos rendimentos superiores a 3978 kg ha^{-1} , calculando os índices nutricionais para cada nutriente segundo o método proposto por Jones (1981). Ademais determinouse a orde de limitación por deficiencia e o índice de balance nutricional.

Cos resultados obtidos puidose avaliar o estado nutricional por provincia, comprobar cales son os nutrientes máis limitantes e prever, a partir do IBN, o rendemento do cultivo.

O xofre limitou moito a produción do cultivo, seguido por nitróxeno, potasio e magnesio. Entre os micronutrientes o cinc e o cobre foron os principais limitantes. Manganeso e calcio foron os elementos que presentaron a maior dispoñibilidade en valores ideais ou superiores.

A información xerada permitirá o desenvolvemento de plans nutricionais máis axeitados aos cultivos con recomendacións que ata agora non son utilizadas, o que contribuirá a unha mellor comprensión da capacidade de cada solo para suministrar nutrientes. Ademais facilitará a toma de decisións dos profesionais e produtores e mellorará o ensino nas universidades.

SUMMARY

The aim of this thesis was to analyse the nutritional status of soybean culture in the main area of Argentina, mainly based on leaf analysis. In order to adequately perform this task, and for the sake of assessing several production areas, representative of the study region, samples were taken in the provinces of Santa Fe, Córdoba and Buenos Aires. Sampling was performed during the R1 stag i.e. flowering initiation; then samples were dried and the following nutrients were determined: nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, sulphur, magnesium, zinc, manganese, copper, iron and boron.

The results obtained were evaluated by comparison with international tables of reference. Moreover, taken into account crop yield in each experimental plot, tables were adjusted based on the obtained data sets.

The DRIS method was employed for assess the nutritional status of the crop. This methods is based on the study of the relationships between all the nutrients analyzed; also it was possible to generate norms for a subpopulation of high yield rates, higher than 3978 kg ha⁻¹ after nutritional indices have been calculated for each study nutrient using the method proposed by Jones in 1981. Likewise, the rank of limitations by deficiency and the nutritional balance index were determined.

The above results allowed evaluating the target nutritional status per province, to verify the most limiting nutrients and to predict the crop yield base on IBN assessment.

Sulphur was the nutrient that most strongly limited crop yield in the main soybean area, and it was followed by nitrogen, potassium and magnesium. Within micronutrients, zinc and copper appeared as the most limiting elements. On the other hand, manganese and calcium were the elements showing the highest availability considering optimum of top high values.

The obtained information should allow to the elaboration of nutrition plans that would be more tight-fitting to crops, using new nutrient recommendations that have not been used, until now. Moreover, such guidance can be considered as the start point for a better assessment of the capacity of a given soil to provide nutrients, also for decision making of professionals and producers and in addition as a method that could help to teaching at the university level.

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| I.- Introducción | 1 |
| I.1. La soja en Argentina | 2 |
| I.2. Caracterización del sistema de Producción | 5 |
| I.2.1. Manejo del cultivo | 5 |
| I.2.2. Fertilización | 8 |
| I.2.2.1. Fertilización y disponibilidad de fósforo | 10 |
| I.2.2.2. Fertilización y disponibilidad de azufre | 14 |
| I.2.2.3. Fertilización y disponibilidad de potasio, calcio y magnesio | 14 |
| I.2.2.4. Fertilización y disponibilidad de micronutrientes..... | 17 |
| I.3. El Cultivo: situación actual | 22 |
| I.4. Características de los suelos..... | 24 |
| I.4.1. Suelos de regiones productoras de soja en el mundo | 24 |
| I.4.1.1. Brasil | 24 |
| I.4.1.2. Estados Unidos | 25 |
| I.4.1.3. Argentina | 25 |
| I.4.1.3.1. Descripción de suelos de la Provincia de Córdoba | 26 |
| I.4.1.3.2. Descripción de suelos de la Provincia de Buenos Aires | 30 |
| I.4.1.3.3. Descripción de suelos de la Provincia de Santa Fe | 38 |
| I.5. Diagnóstico de Fertilidad, situación actual..... | 43 |
| I.6. Diagnóstico del estado nutricional mediante análisis de tejidos | 45 |
| I.6.1. Análisis Foliar | 45 |
| I.6.2. Método DRIS (Diagnosis and Recommendation Integrated System)..... | 47 |
| I.6.2.1. Fundamento | 47 |
| I.6.2.2. Ventajas del sistema DRIS | 49 |
| I.6.2.3. Efectos de diferentes variables sobre las normas DRIS | 49 |
| I.6.2.4. Normas DRIS | 51 |
| II.- Objetivos e hipótesis..... | 52 |
| II.1. Objetivos..... | 53 |
| II.1.1. Objetivo General..... | 53 |
| II.1.2. Objetivos específicos | 53 |
| II.2. Hipótesis..... | 54 |
| III. - Materiales y Métodos..... | 55 |
| III.1. Toma de muestras | 56 |
| III.2. Sitios de muestreo..... | 58 |
| III.3. Preparación de muestras foliares..... | 60 |

| | |
|---|-----|
| III.4. Análisis Químicos..... | 60 |
| III.5. Determinación de la Productividad | 60 |
| III.6. Aplicación del método DRIS | 61 |
| III.6.1. Determinación de las Normas | 61 |
| III.6.2. Cálculo de Índices de Nutrientes N-DRIS | 61 |
| III.6.2.1. Según Beaufils | 62 |
| III.6.2.2. Según Jones..... | 65 |
| III.7. Orden de limitación por deficiencia..... | 68 |
| III.8. Determinación del índice de balance nutricional (IBN)..... | 68 |
| III.9. Establecimiento de la línea de máximos (Boundary Line Developmen System, BOLIDES)..... | 69 |
| IV.- Resultados y discusión..... | 71 |
| IV.1. Clima de los años de evaluación y rendimiento del cultivo..... | 72 |
| IV.2. Concentración de Nutrientes Foliare..... | 73 |
| IV.2.1. Interpretación por rangos de concentración foliar con tablas de referencia | 76 |
| IV.2.2. Desarrollo de Rangos de Interpretación de nutrientes Foliare | 78 |
| IV.2.3. Concentración foliar de los nutrientes por provincia | 81 |
| IV.2.4. Concentración foliar y productividad | 83 |
| IV.3 Método DRIS..... | 85 |
| IV.3.1. Cálculo de normas DRIS | 85 |
| IV.3.2. Índices DRIS | 88 |
| IV.3.3. Índice DRIS y Concentración foliar | 89 |
| IV.3.4. Índices DRIS y Productividad | 92 |
| IV.3.5. Orden de limitación por deficiencia | 95 |
| IV.4. Índice de Balance Nutricional..... | 98 |
| IV.5. Nutrientes deficientes según métodos de Interpretación..... | 100 |
| IV.6. Estatus nutricional del cultivo de soja en Argentina..... | 102 |
| V.- Conclusiones | 103 |
| VI.- Bibliografía..... | 107 |
| VII.- Anexos..... | 118 |

CAPITULO I

I.- Introducción

En este capítulo introductorio se presenta una revisión profunda del cultivo de soja en Argentina, tanto histórica como actual, caracterizando su sistema de producción y manejo, con énfasis en la región núcleo (provincias de Buenos Aires, Santa Fe y Córdoba).

Por otra parte, se destaca un apartado referido a la fertilización tanto de macro como de micronutrientes. Además, se describen y caracterizan los suelos de la región núcleo de Argentina y a su vez, de otras regiones del mundo productoras de soja, como Brasil y Estados Unidos.

Finalmente, se revisan los métodos de diagnóstico de fertilidad, destacando el análisis foliar de valoración directa del grado nutricional del cultivo y el sistema integrado de diagnóstico y recomendación (método DRIS): fundamentos, ventajas y desarrollo de normas.

I.1. La soja en Argentina

La soja es el cultivo de más rápida adopción y expansión en la historia de la agricultura Argentina. De una producción nacional de 59.000 toneladas en 1971, llegó en 30 años a las 25.890.000 toneladas en 2001. La soja se convirtió por su participación en el valor total de la producción y exportación, en el principal producto de la agricultura nacional, alcanzando, según un informe del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), en la campaña 2013/14 una producción de 54.000.000 de toneladas. El importante crecimiento del cultivo de soja se debió fundamentalmente a tres motivos:

1. la adaptación a un amplio rango de ambientes productivos,
2. la mayor rentabilidad relativa y
3. la simplificación de la producción del cultivo.

Estos motivos se potenciaron a partir de la siembra directa (sin laboreo del suelo) y los cultivares tolerantes a glifosato (RR). Entre la década del '70 y '80, la producción creció veintiocho veces a partir de un bajo valor inicial. Entre la década del '80 y '90 lo hizo un 178% y desde comienzos del '90 hasta el 2001 en un 131%. Los cambios en la superficie sembrada entre períodos fueron sucesivamente de 2095%, 142%, 102% y 11% y la variación entre ciclos en el rendimiento fue: 30%, 16%, 12% y 3%. De acuerdo a ello, surge que el componente significativo de los incrementos productivos fue el aumento de la superficie dedicada a la actividad por desplazamiento de otros cultivos y por traslado de actividades ganaderas hacia áreas más marginales. En forma paralela a este desarrollo del cultivo, a partir de medidas de política económica sectorial que favorecían agregarle valor al producto con impuestos diferenciales, y aprovechando el aumento del consumo mundial de aceites vegetales durante los '90, se desarrolló un eficiente complejo agroindustrial oleaginoso. Esto permitió a la Argentina ser en la actualidad el primer exportador mundial de aceite y de harina de soja. Cabe agregar la importancia del aumento de participación en las exportaciones totales considerando que, entre 1980 al 2000, el volumen de comercio de grano creció un 68%, en aceite

117% y harina 91%, La alta competitividad económica relativa de la soja y su alta capacidad de adaptación agronómica a distintos climas y suelos, le permitió extenderse en las tierras agrícolas y mixtas (Baigorri et al., 2002).

Para el año 2008 la superficie sembrada superó los 16 millones de hectáreas, distribuidas en 15 provincias de la Argentina (Figura 1). En la actualidad alcanza los 20 millones de ha.

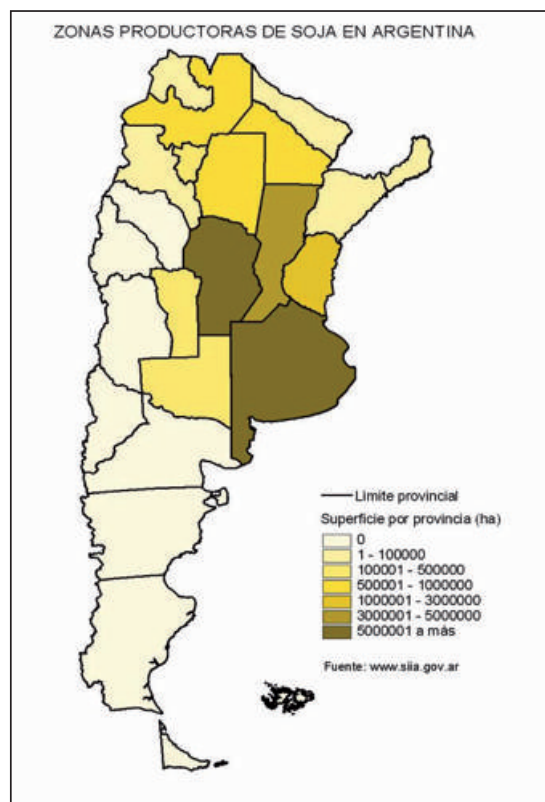


Figura 1. Zonas productoras de soja en Argentina (www.sinavimo.gov.ar).

En cuanto a su distribución, las provincias de Córdoba, Santa Fe y Buenos Aires concentran el 80% de la superficie sembrada (Figura 2).

La gran adaptación a diferentes tipos de suelos y condiciones ambientales de este cultivo hizo que se haya expandido a la mayoría de las provincias agrícolas. La siembra directa o cero labranzas contribuyeron a la expansión del cultivo.

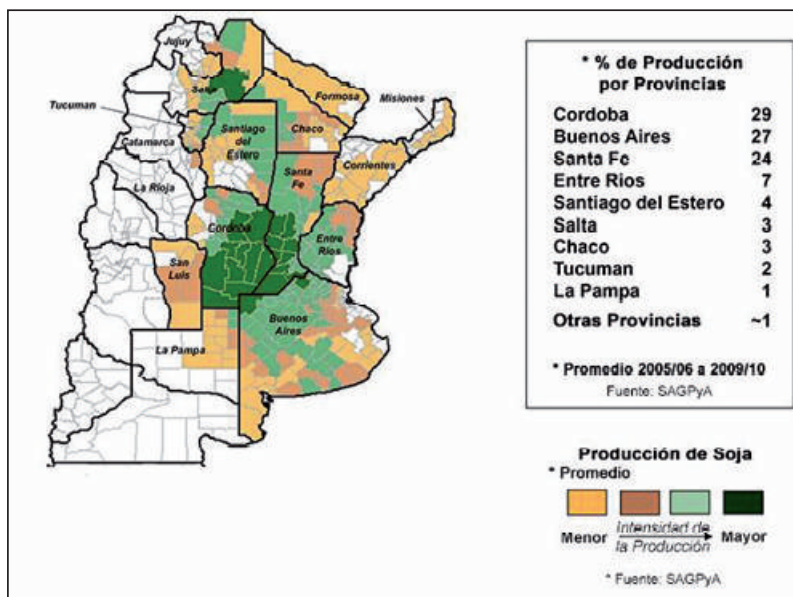


Figura 2. Porcentaje de producción de soja por provincia (SAGPyA).

El rendimiento promedio nacional se sitúa alrededor de los 2600 kg ha⁻¹, presentando una variación del orden de 10% en los últimos años. En la zona núcleo-sojera, que abarca el centro sur de Santa Fé, Sudeste de Córdoba y Norte de Buenos Aires, se logran rendimientos de hasta 5.000 kg ha⁻¹, registrándose valores de rendimiento en parcelas de ensayos de 6.700 kg ha⁻¹.

I.2. Caracterización del sistema de Producción

I.2.1. Manejo del cultivo

Para la producción de soja en Argentina se dispone de un paquete tecnológico que ha permitido incrementar la superficie sembrada, basándose en el ajuste del manejo de: cultivares, fecha de siembra, espaciamiento entre surcos, equipos de siembra, control de enfermedades e insectos y fertilización. También ha sido importante la evolución del sistema de siembra convencional, donde se realizaban labores primarias con la utilización de herramientas como el arado de discos, rastras de discos, rabastos a un sistema de siembra sin movimiento de suelos o cero labranzas. Fue necesario entonces, el desarrollo de equipos de siembra adaptados a sembrar sobre rastrojos y cosechadoras con desparramadores de rastrojo, de diferentes cultivos lo que ha contribuido con la sustentabilidad del sistema. El sistema de siembra directa, al dejar los rastrojos en superficie y no roturar el suelo, ha permitido mejorar la infiltración del agua al aumentar la macro porosidad, disminuir la erosión hídrica, eólica y mejorar los balances de carbono en el suelo, al no favorecer las condiciones de oxidación del carbono orgánico. Un 75% de la superficie sembrada con soja en Argentina, se encuentra en este sistema y en algunos casos con lotes de más 20 años, donde se evidencian problemas de compactación sub-superficial, siendo esto un desafío a resolver. La superficie en siembra directa por provincia se puede ver en la figura 3.

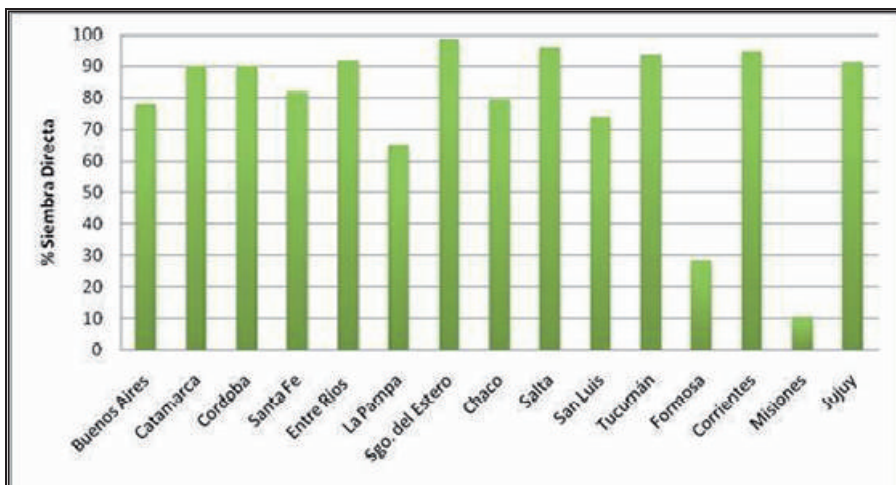


Figura 3. Superficie en siembra directa por provincias (Aapresid 2012).

El mejoramiento genético ha sido un factor clave en la adaptación del cultivo, ya que la soja en Argentina, se siembra desde los 24° a 40° latitud sur, con estaciones de crecimiento de 180 a 100 días respectivamente. En el mundo existen 12 grupos de madurez, clasificados desde el 0 hasta el X, caracterizados por su diferente sensibilidad al fotoperiodo, lo que permite manejar la duración del ciclo (Figura 4). En Argentina se siembran variedades del grupo de madurez II, con una duración del ciclo, de emergencia de plántula a cosecha, de 100 días a grupo de madurez IX, de 180 días de ciclo.

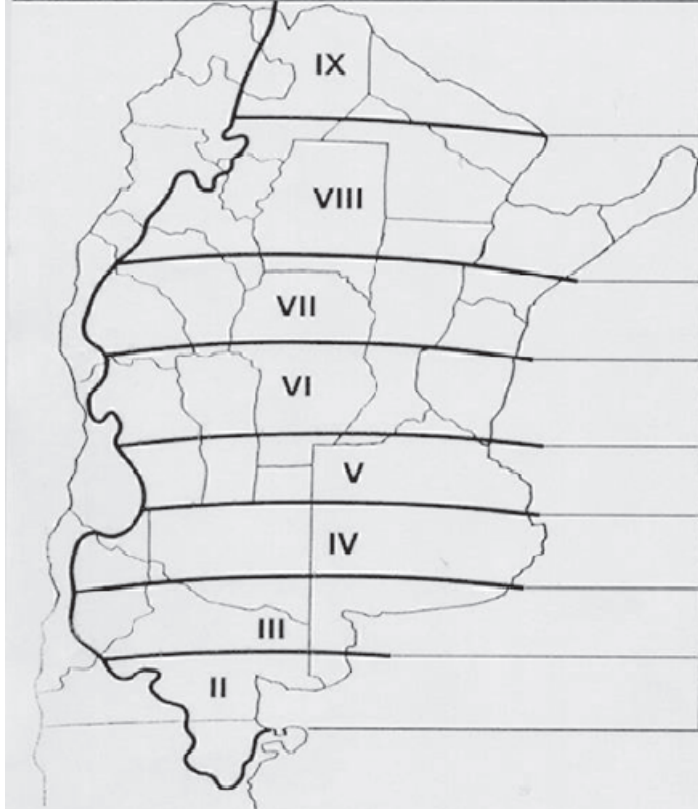
| GRUPO DE MADUREZ QUE SE COMPORTA COMO CICLO MEDIO | GM QUE ES POSIBLE UTILIZAR | N° DE GM |
|--|----------------------------|----------|
|  | IV AL IX | 6 |
| | IV al IX | 6 |
| | IV al VIII | 5 |
| | IV al VII | 4 |
| | III al VII | 5 |
| | III al V | 3 |
| | II al IV | 3 |
| | I al III | 3 |

Figura 4. Franjas latitudinales de adaptación de los GM de soja en Argentina (Guía práctica para el cultivo de soja. INTA).

En función de la caracterización de los ambientes, por suelo, oferta de precipitaciones y temperatura se han ajustado, mediante ensayos de fechas de siembra que van desde septiembre hasta diciembre, diferentes combinaciones de espaciamiento entre líneas y genotipos, para encontrar la mejor combinación para alcanzar los máximos rendimientos.

En cuanto a fecha de siembra, para la zona núcleo (sureste de Córdoba, norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe), se concentra entre el 15 de octubre al 15 de noviembre, con variedades de grupo III y IV, a un espaciamiento entre líneas de 35 a 52 cm con lo cual se logran rendimientos mayores a 4.000 kg ha⁻¹. En la zona centro norte del país, la siembra puede extenderse hasta los primeros días de enero, con variedades del grupo V al VIII, donde el potencial

de rendimiento para estos ambientes es menor. La cosecha comienza a partir del mes de marzo para la región núcleo, culminando en el mes de mayo en el resto de las regiones del país.

I.2.2. Fertilización

En lo que respecta a la fertilización, para realizar un diagnóstico de fertilidad, se requiere de un conocimiento previo de los niveles de absorción y extracción de cada uno de los nutrientes para lograr el rendimiento objetivo. En la Tabla 1 se presentan los requerimientos de absorción total durante todo el ciclo del cultivo de soja, el índice de cosecha de los nutrientes y su correspondiente extracción por tonelada de grano cosechado.

Tabla 1. Requerimientos nutricionales e índice de cosecha de nutrientes en soja (INPOFOS. Archivo Agronómico N°3, 2002).

| Nutriente | Requerimiento | Índice de cosecha del nutriente | Rendimiento de 4000 kg/ha | |
|-----------|---------------|---------------------------------|---------------------------|---------------------|
| | kg/ton grano | | Necesidad kg/ha | Extracción kg/ha |
| Nitrógeno | 80 | 0.75 | 320 | 240 |
| Fósforo | 8 | 0.84 | 32 | 27 |
| Potasio | 33 | 0.59 | 132 | 78 |
| Calcio | 16 | 0.19 | 64 | 12 |
| Magnesio | 9 | 0.30 | 36 | 11 |
| Azufre | 7 | 0.67 | 28 | 19 |
| | g/ton grano | | g/ha | g/ha |
| Boro | 25 | 0.31 | 100 | 31 |
| Cloro | 237 | 0.47 | 948 | 446 |
| Cobre | 25 | 0.53 | 100 | 053 |
| Hierro | 300 | 0.25 | 1200 | 300 |
| Manganeso | 150 | 0.33 | 600 | 198 |
| Molibdeno | 5 | 0.85 | 20 | 17 |
| Zinc | 60 | 0.70 | 240 | 168 |

El cultivo de soja, tradicionalmente, se realizó con nulo a reducido uso de fertilizantes en la mayoría de las regiones de producción del país. En la década del '90, se fertilizaba el 30 al 36% del área con soja implantada con barbecho previo y el 18 al 23% en las siembras sobre trigo. Asociado con la disponibilidad de fósforo de los suelos, los porcentajes menores se han

encontrado en La Pampa (8%) y norte de Buenos Aires (5,2%) (Baigorri et al., 2002).

En la actualidad el área fertilizada con P es bastante generalizada, en los últimos años, más del 60% de los productores fertiliza habitualmente los cultivos de soja, proporción que aumenta al 80 o 90% en las principales regiones productoras del sur de Santa Fe, oeste y norte de Buenos Aires. Entretanto, en el norte argentino, en las provincias de Chaco, Salta, Tucumán y Santiago del Estero, casi ningún productor lo hace, ya que los suelos poseen niveles más altos de fósforo, resultado de su mayor dotación original y su más reciente colonización agrícola.

Un factor de peso importante en Argentina es la gran proporción de agricultura en campos arrendados, que en conjunto comprende aproximadamente el 50% del área agrícola (60% o más en algunas zonas). Los campos para agricultura se arriendan por contratos renovables de un año a otro, fijándose su precio en un volumen fijo de producción de soja. El productor arrendatario normalmente siembra soja o trigo-soja de segunda, con bajo nivel de utilización de insumos, de modo a maximizar el ingreso, generando así un escaso compromiso con la sostenibilidad y la relación con los propietarios, factores que conducen en definitiva a la subutilización de fertilizantes.

La realidad es que normalmente los productores guían sus decisiones por los análisis de suelo en primer lugar y luego por las relaciones de precios (kg de fertilizante kg de soja⁻¹), para determinar las cantidades a utilizar en la fertilización de soja y así hacer más eficiente el proceso. Según relevamientos realizados entre 800 productores de la región pampeana, 54% revelan que siempre hacen análisis de suelos de sus lotes y 34% lo hace esporádicamente (Fertilizar, 2006).

Los nutrientes más utilizados en la fertilización son el fósforo y el azufre, este último relacionado con ambientes de 60-70 años de agricultura, sin rotación y que en el pasado han sido trabajados con laboreos convencionales, donde el contenido de materia orgánica no supera el 2%.

No se han encontrado hasta el momento respuestas claras a otros nutrientes, siendo en la actualidad investigados el magnesio, boro y zinc.

Los niveles de materia orgánica, en la zona núcleo sojera, han disminuido con la explotación agrícola de los suelos (Figura 5). El área con los menores valores se encuentra en el suroeste de Córdoba (0,0 a 1,9%). En el sureste de Buenos Aires, si bien los suelos muestran pérdida de materia orgánica por su uso, es en esta zona donde se observan los porcentajes más altos (>6%).

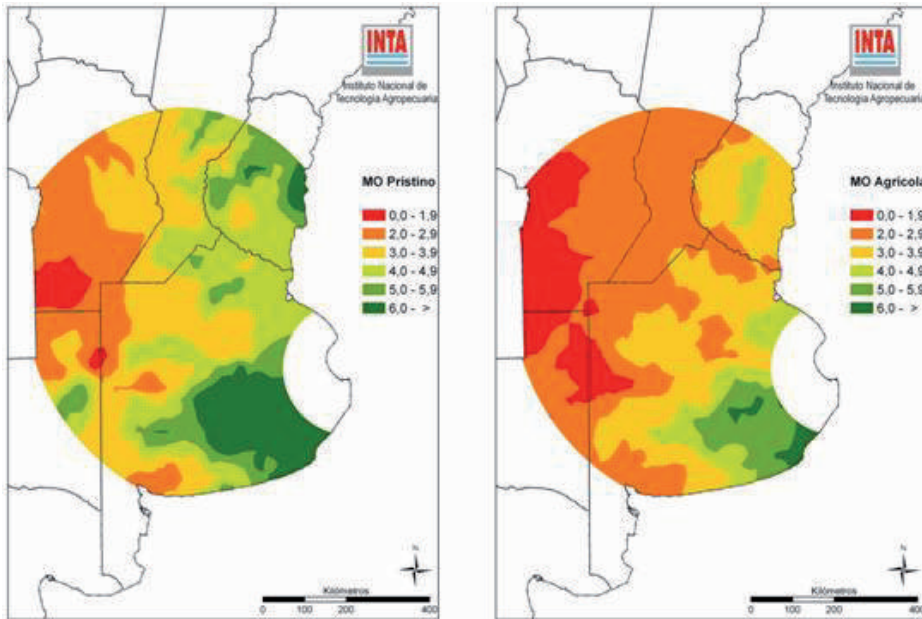


Figura 5. Niveles de materia orgánica en suelos prístinos y suelos agrícolas en la región pampeana y extrapampeana. Muestreo 2010-11 (Fertilizar, 2013).

1.2.2.1. Fertilización y disponibilidad de fósforo

En cuanto a la fertilización con fósforo, investigaciones recientes indican que los fosfatos mono y diamónico se usan alrededor de un 43% en el área sembrada, mientras que un 23% utiliza superfosfato triple, un 11% con superfosfato simple y el resto (23%) mezclas físicas que incluyen alguno de los anteriores. Si bien hay alguna proporción menor que aplican los fertilizantes al voleo, previo a la siembra, la gran mayoría lo realiza en bandas en la siembra al costado o en línea (Fertilizar, 2006). Las dosis promedio de uso expresada

como P_2O_5 es alrededor de 34 kg ha^{-1} , siendo el uso ponderado de 27 kg , o expresada en P de $11,6 \text{ kg ha}^{-1}$, lo que para un rendimiento medio nacional de $2,9 \text{ tn ha}^{-1}$ apenas equilibra las cantidades extraídas.

En la figura 6, se observa la evolución a través de los años de la disponibilidad de fósforo en el suelo para la región pampeana argentina, donde se comparan los niveles de fósforo muestreados en el año 2006 y los relevamientos realizados por Darwich (1980; 1999). El área de alta disponibilidad de fósforo ha disminuido notablemente, aunque también así lo hizo el área de baja disponibilidad, siendo mayor, en el año 2006 el área de disponibilidad media de fósforo.

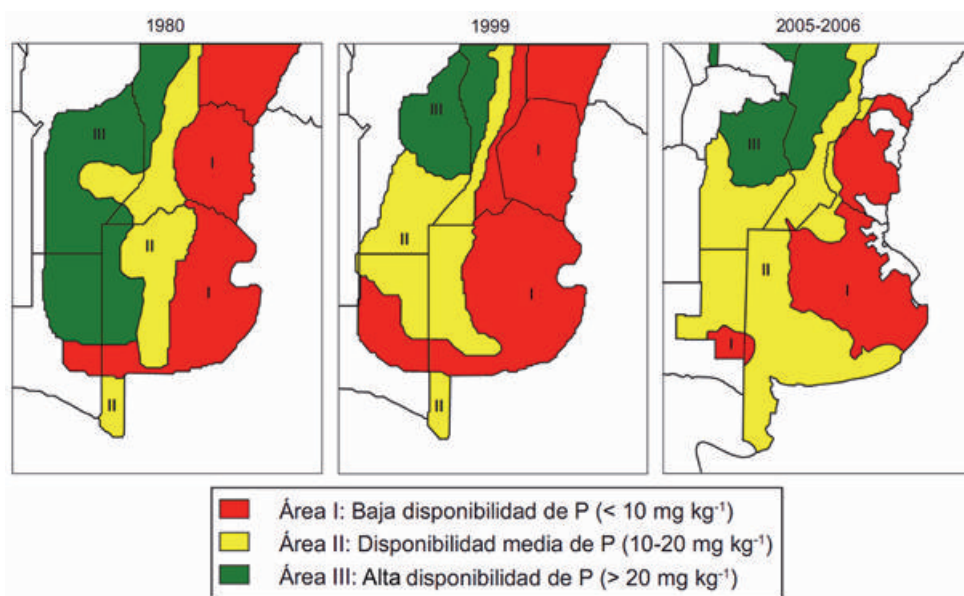


Figura 6. Comparación entre los relevamientos realizados en 2006 y los realizados por Darwich (1983; 1999) para la región pampeana (Fertilizar, 2013).

Para la fertilización fosfatada, los criterios más ampliamente usados son de dos clases, el de suficiencia y el de reposición. El criterio de suficiencia procura fertilizar si existe la posibilidad de obtener una respuesta económica cuando el nivel de P disponible del suelo es inferior a un denominado nivel crítico, el cual se entiende como el valor de disponibilidad que separa el nivel de deficiencia (respuesta) del nivel de suficiencia (baja probabilidad de respuesta). El concepto de suficiencia interpreta los resultados de los análisis y

establece rangos para los niveles bajo, medio y alto y los asocia a probabilidades de respuestas de los cultivos a la aplicación de fertilizantes, que pueden ser: alta, baja, media, nula (Figura 7).

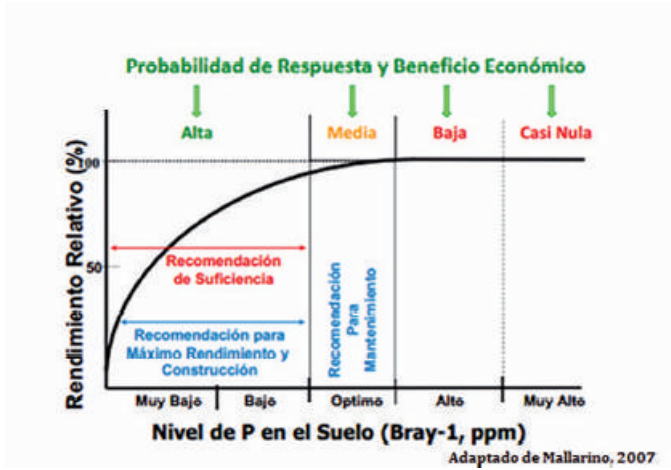


Figura 7. Probabilidad de respuesta según nivel de P en el suelo (INTA, Proyecto Fertilizar).

De acuerdo a la relación observada, los suelos con niveles de P Bray y Kurtz I menores de 10-14 mg kg⁻¹ presentarían respuestas rentables a la fertilización fosfatada. Por encima de 14 mg kg⁻¹ la respuesta es muy baja hasta hacerse nula (Figura 8).

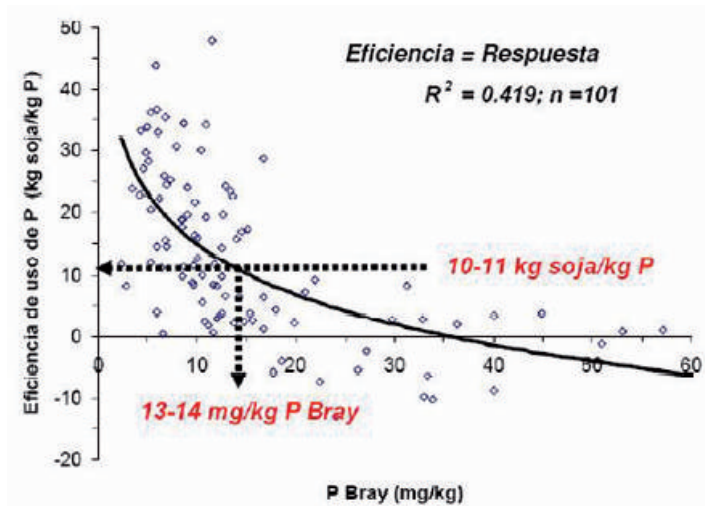


Figura 8. Respuesta a P según niveles de P Bray en el suelo (García 2005).

El Criterio de reposición tiene que ver con el aporte de una cantidad de P equivalente a lo que se espera extraer con el cultivo. Como éste no se conoce a priori, se estima en función del rendimiento esperable y el contenido promedio de P en el cultivo, considerando la planta completa o el grano (Tabla 2), otra opción es aplicar al cultivo siguiente lo extraído por el cultivo anterior. La reposición parte de un concepto muy simple, que es devolver al suelo los nutrientes extraídos por el cultivo y exportados en los granos, de modo de mantener el suelo en el mismo estado de fertilidad original y con la misma capacidad productiva.

Tabla 2. Recomendaciones de fertilización fosfatada para soja según nivel de P Bray y rendimiento esperado (Echeverría y García, 1998).

| Rendimiento | P disponible Bray 1 (mg kg^{-1}) | | | | |
|---------------------|---|---------|---------|----------|-----------|
| | >4.0 | 4.1-6.0 | 6.1-8.0 | 8.1-11.0 | 11.0-16.0 |
| mt ha^{-1} | $\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ | | | | |
| 2.0 | 43 | 33 | 28 | 24 | - |
| 2.5 | 49 | 39 | 34 | 30 | - |
| 3.0 | 55 | 45 | 40 | 36 | 25 |
| 3.5 | 61 | 51 | 46 | 42 | 31 |
| 4.0 | 67 | 57 | 52 | 48 | 37 |
| 4.5 | 73 | 63 | 58 | 54 | 43 |

Una variante de este criterio de la reposición es el mantenimiento y la reconstrucción. Se diferencian en que si bien todos aluden a “reponer” los nutrientes extraídos, la dosis de mantenimiento implica agregar una cantidad que no ocasione pérdidas de fertilidad en el mediano plazo, mientras que dosis superiores a ésta constituyen dosis de reconstrucción de la fertilidad. Este concepto de “fertilizar el suelo”, implica la acumulación y el mantenimiento de un reservorio de nutrientes a diferencia de “fertilizar el cultivo”. Aún con niveles altos del nutriente en el suelo, se recomienda su aplicación para sustituir la cantidad que probablemente retirará el cultivo que se cosechará.

I.2.2.2. Fertilización y disponibilidad de azufre

En cuanto a la fertilización con azufre, en los últimos años se han observado respuestas a la fertilización a este nutriente en soja y en otros cultivos de la región pampeana, principalmente en el centro y sur de Santa Fe, sudeste de Córdoba, centro, oeste y norte de Buenos Aires, este de La Pampa; y en el noroeste (Tucumán-Catamarca). Las respuestas se observan principalmente en suelos degradados, con muchos años de agricultura continua (especialmente soja), y con historia de cultivos de alta producción con fertilización nitrogenada y fosfatada, en suelos arenosos de bajo contenido de materia orgánica (Figura 5). Estas respuestas han sido observadas en cultivos de siembra de primera con aplicaciones directas, y en cultivos de segunda, como en la soja, con aplicaciones en el cultivo antecesor, generalmente trigo. Las respuestas varían entre 300 y 800 kg ha⁻¹ según el sitio. Si bien hay claros indicios de cuáles son los ambientes de respuesta a la fertilización azufrada, aun no se dispone de una metodología confiable para predecir los sitios con respuesta probable (Gentiletti y Gutiérrez Boem, 2004). Un factor de importancia actualmente en evaluación, es la caracterización de sitios deficientes determinando la concentración de azufre en grano del cultivo anterior.

Las dosis recomendadas varían, según el nivel de rendimiento esperado y la historia agrícola del lote, entre 10 y 15 kg ha⁻¹ de azufre elemento en soja de primera y entre 15 y 20 kg ha⁻¹ de azufre en aplicaciones al trigo para el doble cultivo trigo/soja.

I.2.2.3. Fertilización y disponibilidad de potasio, calcio y magnesio

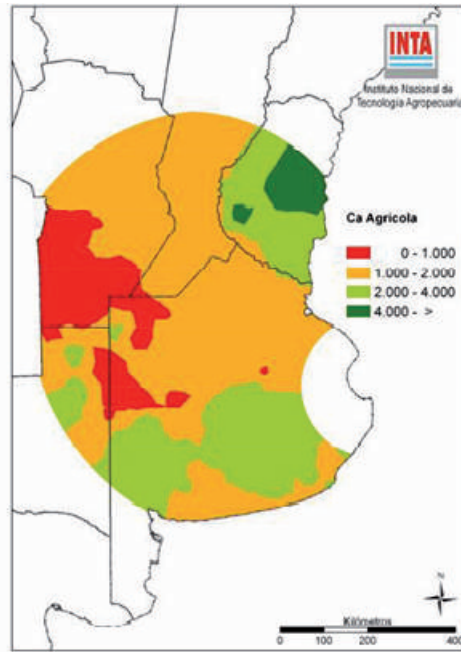
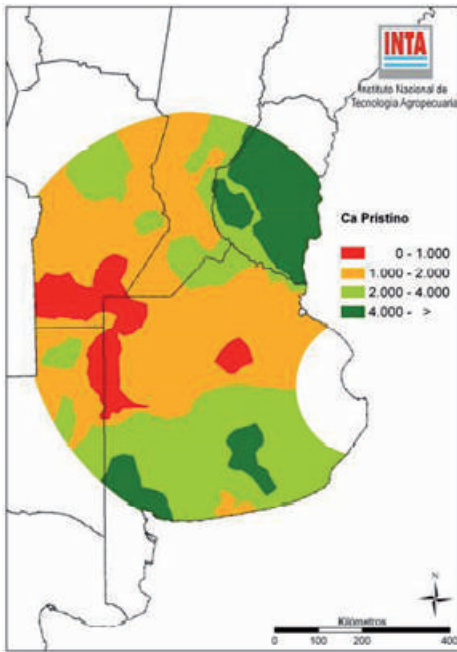
La fertilización con potasio, magnesio y calcio en cultivos de granos de Región Pampeana es prácticamente nula, y muy incipiente debido a la disponibilidad de estos nutrientes en el suelo (Figura 9), donde se puede apreciar la situación actual (suelos agrícolas) de disponibilidad y la condición prístina.

Estos nutrientes muestran diferentes casos de su uso en las distintas regiones productoras de Brasil y Paraguay y no se conoce concretamente su uso y manejo en Argentina (Melgar et al., 2011).

Los suelos en Argentina, muestran una mayor caída en las cantidades de potasio debido a la extracción de los cultivos. La disponibilidad original era elevada en esta región relacionado a la mineralogía de estos sedimentos que es rica en diversos minerales como la mica, que le confirieron a los suelos actuales una elevada concentración de potasio intercambiable y minerales de arcilla como la illita, que puede liberar este nutriente a la solución del suelo.

La disponibilidad original de magnesio de los suelos pampeanos era elevada y no se evidencian grandes disminuciones en los niveles de este nutriente por el uso agrícola.

Los niveles de calcio han disminuido por el uso del suelo, solo el centro y sur de las Provincias de Entre Ríos y Buenos Aires conservan, en parte, los niveles de los suelos prístinos. La intensificación de la agricultura ha resultado en la disminución de los niveles de bases y pH en algunos suelos, especialmente en el norte de la región pampeana, con respuestas significativas a la aplicación de enmiendas calcáreas y/o dolomíticas en soja (García, F. O.).



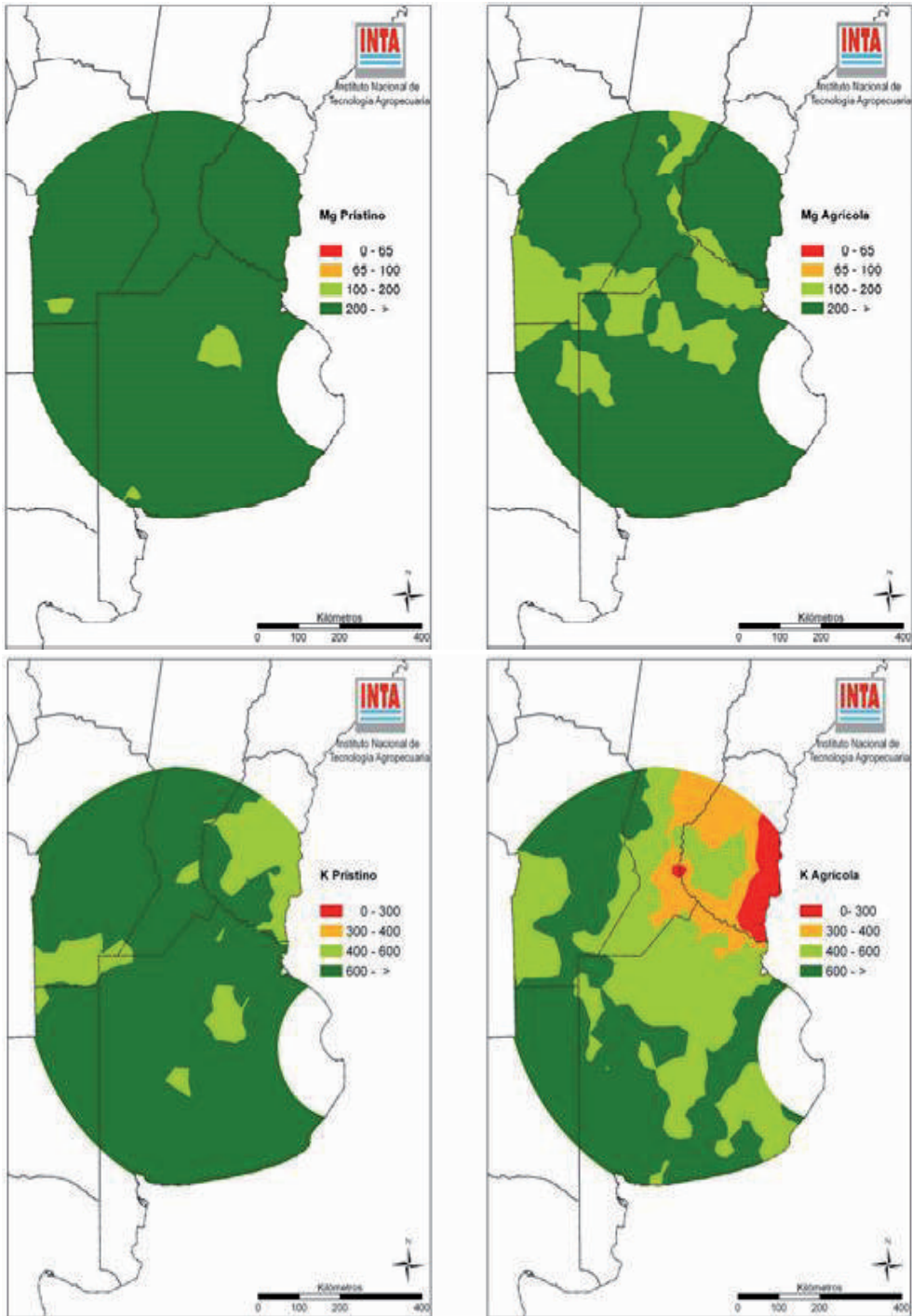


Figura 9. Niveles de calcio, magnesio y potasio (mg kg^{-1}) en suelos prístinos y suelos agrícolas de la región pampeana argentina (Fertilizar, 2013).

I.2.2.4. Fertilización y disponibilidad de micronutrientes

Los análisis de suelos en la región pampeana indicarían a boro, zinc, molibdeno y cobre como elementos a tener en cuenta. En los últimos años se vienen realizando experiencias para evaluar el efecto de estos nutrientes no tradicionales en el cultivo y no han demostrado una alta eficiencia. Esto se debe seguramente a los deteriorados niveles de los nutrientes principales que son los que limitan la producción (Galarza et al., 2001).

En Brasil, el uso de micronutrientes está muy difundido, mientras que en Argentina su uso es más incipiente. Los micronutrientes más demandados son el boro y el zinc, cuya deficiencia está relacionada a la carencia de los suelos, como así también a su encalado (Melgar et al., 2011).

Para realizar un mapeo del suelo en cuanto a la disponibilidad de los nutrientes boro, zinc y cobre, en 2010 y 2011 se tomaron muestras georeferenciadas (0-20 cm) de lotes bajo agricultura, de algunos partidos del sur, oeste y norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe (Eyherabide et al., 2012). La agricultura continua ha disminuido los niveles de materia orgánica de los suelos, lo que junto con la nula reposición de boro, zinc y cobre podría generar deficiencias de estos nutrientes.

Cobre y cinc son elementos esenciales para el crecimiento y reproducción vegetal, su deficiencia repercute negativamente en la producción, tanto en el rendimiento como en la calidad (Torri et al., 2007).

En promedios los niveles de boro por zona (Figura 10) variaron de 1,37 a 1,85 mg kg⁻¹ en suelos agrícolas, los cuales no serían limitantes, salvo en el norte de la región. Los balances negativos de materia orgánica, fósforo y la acidificación de los suelos podrían contribuir a acentuar la disminución de los niveles de boro ocasionados por la no reposición del mismo. Si bien no existen umbrales de respuesta de boro ajustados para la región, tomando como referencia los valores citados por Rivero et al. (2008), los que clasifican a los suelos con contenidos bajos con menos de 0,5 mg kg⁻¹ y moderados si los mismos tienen entre 0,5 y 1 mg kg⁻¹, la mayor parte de los suelos bajo agricultura muestran contenidos altos de boro (entre 1 y 2 mg kg⁻¹). Sin embargo, algunas áreas relevantes al sur y noreste de Santa Fe mostraron

contenidos menores a 1 mg kg^{-1} los que podrían ser particularmente limitantes para la producción de los cultivos con mayores requerimientos. Si bien es todavía escaso el número de muestras analizadas, estos resultados confirman lo reportado por Ratto de Míguez y Fatta (1990) y por Rivero et al. (2008), quienes informaron bajos contenidos de boro en algunos suelos del norte de la región pampeana. Por el contrario, los suelos del sudeste de Buenos Aires están en el rango de muy alta concentración, por lo que el mismo no sería limitante en el mediano plazo. Los resultados sugieren que en general los niveles de boro en suelos bajo agricultura han disminuido pero solo serían limitantes en el norte de la región, donde se identificaron zonas con valores menores a los umbrales de suficiencia.

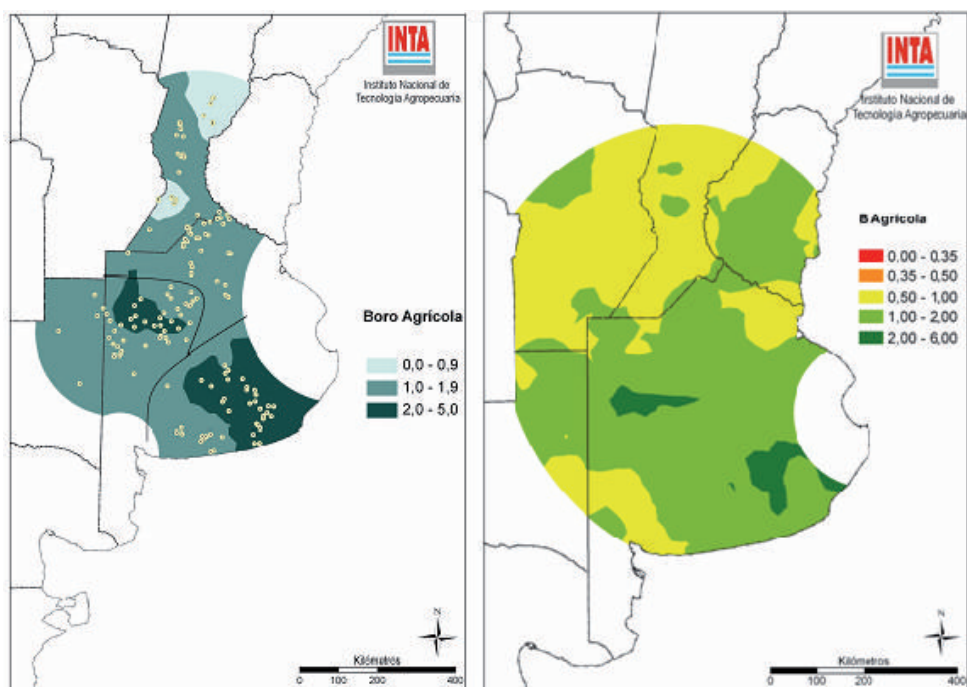


Figura 10. Boro disponible (mg kg^{-1}) en suelos agrícolas en algunas zonas de la región pampeana Argentina (Izquierda: Eyherabide et al. (2012). Derecha: Fertilizar (2013).

En cuanto a zinc, los resultados indican que los niveles en suelos bajo agricultura han disminuido notablemente en el sur de Santa Fe, noreste de La Pampa, norte, oeste y sur de Bs As, encontrándose cercanos a los umbrales de

deficiencia (Figura 11). A nivel regional, la variación de zinc disponible se asoció en mayor medida con la variación de P-Bray y en menor medida con materia orgánica y pH. Los resultados sugieren que los balances negativos de fósforo y materia orgánica de los suelos bajo actividad agrícola podrían contribuir a acentuar aún más la caída de los niveles de zinc ocasionados por la falta de reposición en los fertilizantes. Eyherabide et al. (2012) determinaron el mapa de disponibilidad de zinc, considerando que concentraciones menores de $0,5 \text{ mg kg}^{-1}$ fueron calificadas como muy bajas, de $0,5$ a 1 mg kg^{-1} como baja a media, y mayores de $1,0 \text{ mg kg}^{-1}$ como alta. Estos rangos son similares a los propuestos por Rivero et al. (2008) para la región pampeana.

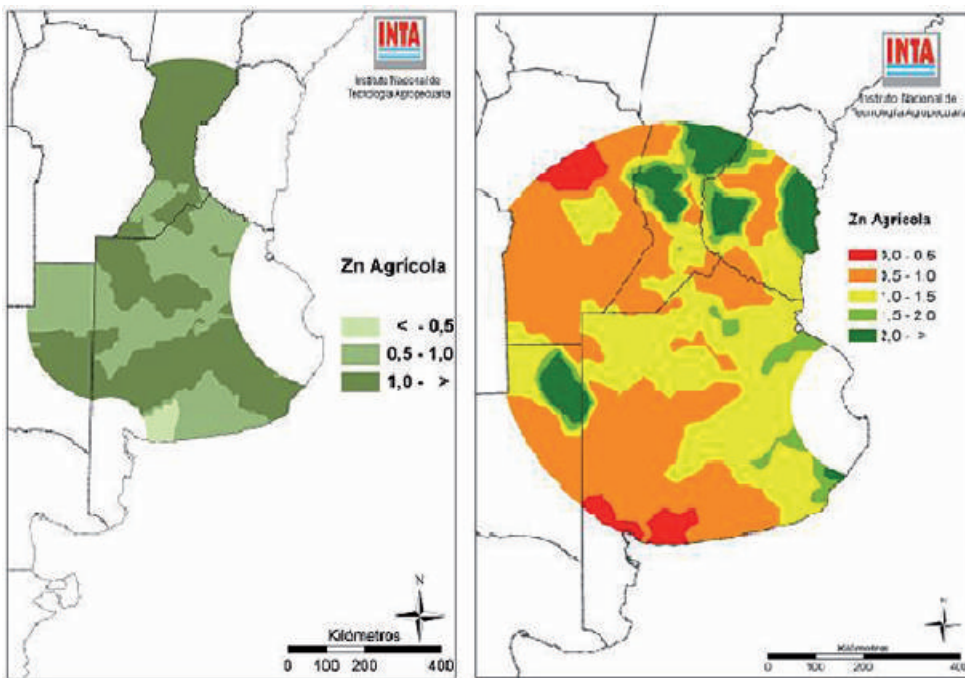


Figura 11. Zinc disponible (mg kg^{-1}) en suelos agrícolas en algunas zonas de la región pampeana Argentina. (Izquierda: Eyherabide et al. (2012). Derecha: Fertilizar (2013).

Para cobre, los resultados indican que en suelos en producción agrícola no han disminuido considerablemente su disponibilidad en gran parte de la región bajo estudio (Figura 12). Los valores disponibles se encuentran por

encima de los umbrales críticos citados en la bibliografía, por lo que no se esperaría deficiencia de este nutriente en el mediano plazo. El mapa de disponibilidad de cobre realizado, muestra rangos de concentraciones menores a $0,3 \text{ mg kg}^{-1}$ (muy baja disponibilidad), de $0,3$ a $0,6 \text{ mg kg}^{-1}$ (baja a media) y mayores a $0,6 \text{ mg kg}^{-1}$ (alta concentración) (Eyherabide et al., 2012). Estos rangos son similares a los propuestos por Kruger et al. (1985).

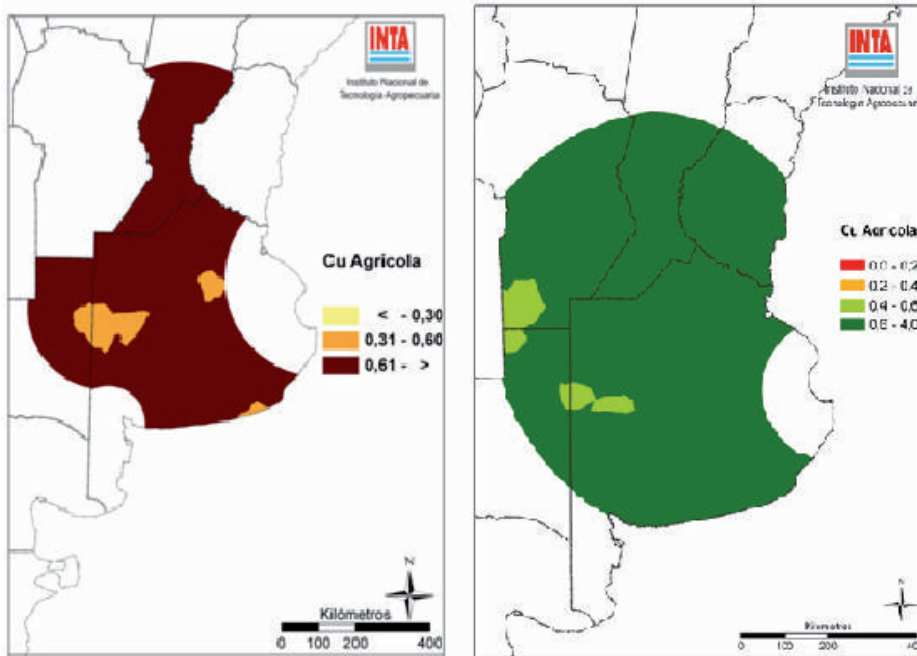


Figura 12. Cobre disponible (mg kg^{-1}) en suelos agrícolas en algunas zonas de la región pampeana Argentina. (Izquierda: Eyherabide et al. (2012). Derecha: Fertilizar (2013).

Con respecto a manganeso y hierro, en la región pampeana los suelos no manifiestan variaciones importantes en las concentraciones, en relación a los suelos más antiguos (Figura 13). Para manganeso, el sur de Córdoba y Oeste de Buenos Aires presentan valores medios (10 a 30 mg kg^{-1}), mientras que el resto de la región pampeana muestra valores mayores (30 a 90 mg kg^{-1}).

Para hierro, los suelos pobres en materia orgánica, con pH entre $7,5$ y $8,5$, calcáreos con carbonatos libres, son candidatos a presentar deficiencias de este nutriente. Por el contrario, los suelos ligeramente ácidos con

contenidos aceptables de materia orgánica y/o condiciones de drenaje restringido, difícilmente presentarán deficiencias de hierro. La disponibilidad de hierro promedio ponderado en la región es alta ($94,72 \text{ mg kg}^{-1}$) (Cruzate et al., 2006).

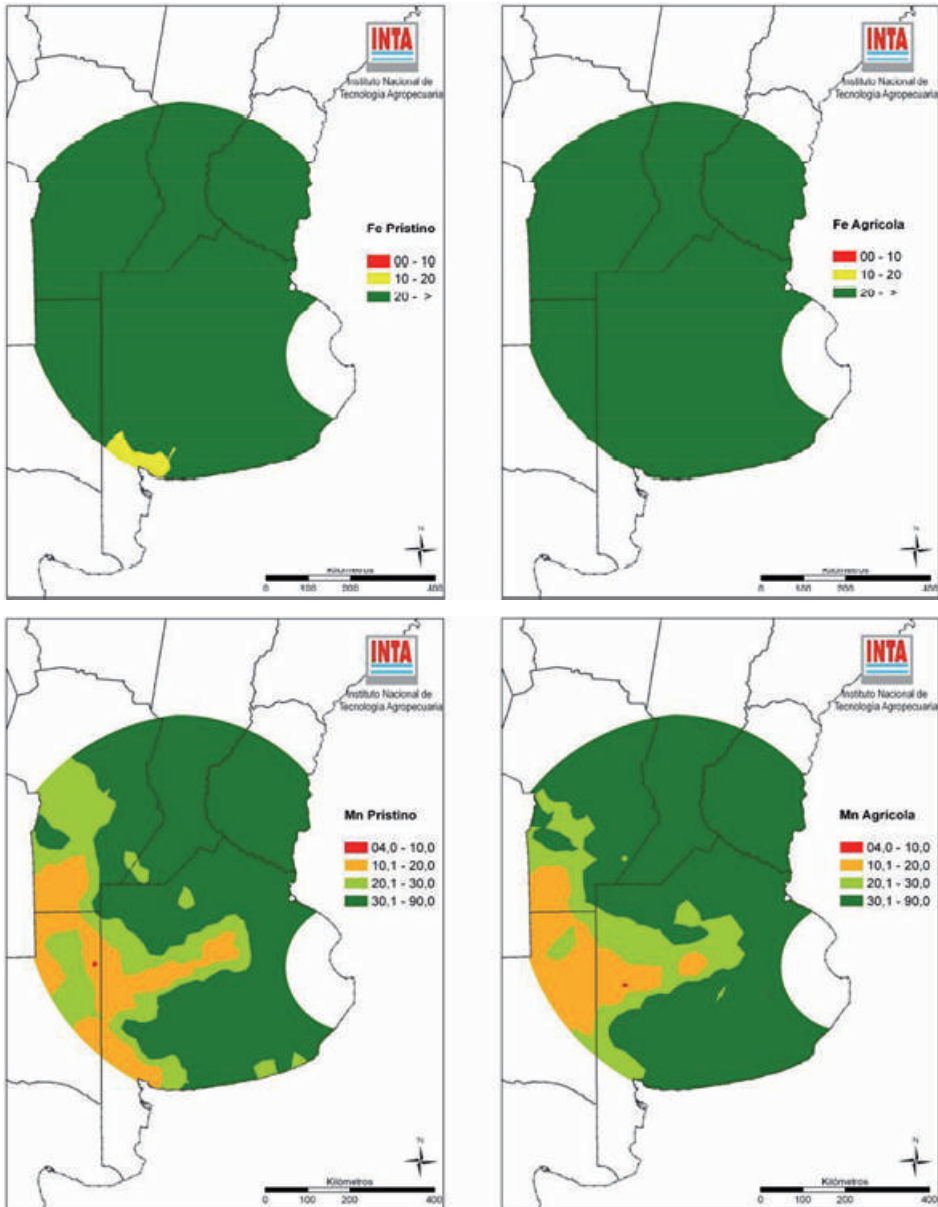


Figura 13. Disponibilidad de hierro y manganeso (mg kg^{-1}) en suelos prístinos y suelos agrícolas en algunas zonas de la región pampeana Argentina (Fertilizar, 2013).

I.3. El Cultivo: situación actual

Hoy en día, la soja ya ocupa el 50% de la superficie cultivada en la Argentina. Es el principal cultivo agrícola y genera ingresos económicos por exportación de granos y subproductos, superiores a cualquier otra producción de origen agropecuario, constituyendo una significativa proporción de las divisas que ingresan al país, contribuyendo a suministrar alimentos a todo el mundo. Sin embargo, es cuestionable, si puede esta producción de cultivo alimentar a una población mundial cada vez más numerosa y a la vez, si puede hacerlo sin afectar de forma negativa la sostenibilidad de los sistemas agroecológicos. En Argentina, la producción de soja se concentra en la llamada zona núcleo, que responde casi por el 80% de la totalidad del área plantada. En nuestro país, la expansión de la producción de soja para atender la creciente demanda por este producto, ha tenido lugar en mayor medida por medio del incremento del área de cultivo que por el aumento de la productividad. A la vez la soja ha ido aumentando su participación en las rotaciones, una intensificación del uso de los suelos que, en muchos casos, es acompañada de una indebida reposición de nutrientes, siendo una de las principales causas del deterioro de los suelos. Esto lleva, por un lado, a situaciones limitantes para una adecuada producción y por otro, dificulta la expresión de altos rendimientos del cultivo. Si bien los rendimientos promedios nacionales se han incrementado desde los años 70 (1500 kg ha^{-1}) al año 2002 (2630 kg ha^{-1}) (SAGPyA, 2002), en los últimos años este promedio no ha mostrado fuertes evoluciones. Según el Informe de calidad de soja 2013-2014 presentado por el INTA Marcos Juárez, el rendimiento promedio nacional fue de 2830 kg ha^{-1} , mientras que en la región núcleo-sojera el rinde de la soja de primera superó al promedio de los últimos cinco años que fue de 3200 kg ha^{-1} . Dentro de estas estadísticas, se encuentran regiones con muy bajos rindes y otras con rendimientos mayores a este promedio. Por ejemplo, para la misma campaña, en Córdoba los rendimientos variaron de 2000 a 5000 kg ha^{-1} con un promedio de 3040 kg ha^{-1} . Potencialmente se podrían alcanzar altos rindes, superiores a los 5000 kg ha^{-1} . De hecho, en otras regiones del mundo se han logrado rindes excepcionales, como en EE UU de 7963 kg ha^{-1} (Flannery, 1989), o como el informado por la Asociación de soja de Missouri en el

suroeste de Missouri, uno de los más altos registrados, con un rendimiento de 10800 kg ha⁻¹, en el año 2010 (Purcell et al., 2012). Estos rendimientos anormalmente altos, han creado cierta controversia y abren el debate de generar conocimientos para proporcionar prácticas de gestión clave para lograr rendimientos de la soja, de esta magnitud.

Esta diferencia entre niveles de rendimientos puede asociarse en parte a variaciones en la oferta ambiental de recursos; y en gran parte estar asociada al manejo del cultivo, dentro de esto último, la nutrición. Frente a los bajos rendimientos y la fluctuación de precios donde los costos de los insumos siguen una tendencia en aumento mientras que el productor no recibe grandes incrementos en el precio por su producto, se opta por utilizar menos insumos para reducir costos, con una consecuente reducción de la producción. Pero lo que se debe analizar es que esto no hace que el productor obtenga más ganancias, ya que solamente rendimientos altos dan una mejor oportunidad de ser más rentable. Los rendimientos altos reducen el riesgo al distribuir los costos de producción en un mayor número de unidades producidas. Esto hace que el costo de producción por unidad de producto sea menor. La combinación de altos rendimientos y bajos costos por unidad, brindan al agricultor la mejor oportunidad para obtener rentabilidad, aun cuando los precios del producto estén bajos. Por supuesto, las ganancias se incrementan cuando los precios son más altos. Los altos rendimientos de cualquier cultivo no sólo significan mayores ganancias, sino que son también un claro indicativo de que se utilizan prácticas de manejo que promueven la sostenibilidad del sistema y que son amigables con el ambiente.

Esto último genera la necesidad de contar con una herramienta confiable que nos permita conocer el estatus nutricional de los cultivos, para un correcto diagnóstico y una recomendación adecuada, para contribuir a acortar la brecha productiva existente, logrando así la sustentabilidad del sistema de producción y una maximización de la rentabilidad.

I.4. Características de los suelos

I.4.1. Suelos de regiones productoras de soja en el mundo

I.4.1.1. Brasil

El Cerrado, la extensa sabana de Brasil central, es topográficamente apropiada para la producción de soja, y en esta zona el cultivo ha prosperado. Los suelos fértiles, clasificados como Alfisoles, constituyen solo el 1,7% de la superficie. Los suelos predominantes son Oxisoles y Ultisoles, que en conjunto comprenden el 63,9% de la zona. Los Entisoles, principalmente arenas cuarzosas de baja fertilidad, son el tercer tipo de suelo predominante, y representan el 15% de las tierras. El desarrollo de la tecnología de manejo de éstos ha sido un componente esencial del éxito de la producción de soja.

Los Oxisoles de las regiones tropicales están constituidos principalmente por caolinita, cuarzo y óxidos hidratados que tienen baja capacidad de intercambio catiónico. Además, la materia orgánica que contribuye a dicho intercambio en el suelo tiende a ser baja. Los problemas de estrés mineral que afectan a la soja se deben principalmente a la baja capacidad de retención y fuerte fijación de los fosfatos por sesquióxidos de hierro y aluminio libres y componentes arcillosos. Estos suelos son generalmente deficientes en calcio, magnesio y potasio, no reteniendo estas bases cuando son aplicadas como fertilizantes. El aluminio intercambiable y el manganeso pueden estar presentes en niveles tóxicos para la soja. La deficiencia de molibdeno se encuentra en algunos Oxisoles, las de cobre y boro se registran con menor frecuencia (Galrao, 1988).

El horizonte subsuperficial de los Ultisoles se caracteriza por la acumulación de arcillas, escasas bases, una lixiviación muy acentuada, fuerte acidez, agotamiento de las bases y posible toxicidad de aluminio, manganeso y hierro. La materia orgánica también es escasa, y por consiguiente la deficiencia de nitrógeno es una limitación común de los cultivos en los Ultisoles, al igual que los Oxisoles.

Los Entisoles presentan una leve diferencia del horizonte y derivan de arenas con una gran proporción de cuarzo. Poseen pocos minerales primarios

inestables que se han de disolver, lo que les confiere escasos elementos de fertilidad y un estrés mineral constante, baja capacidad de intercambio catiónico y de retención del agua. Los Entisoles derivados de materiales cuarzosos son siempre deficientes en potasio.

I.4.1.2. Estados Unidos

La mayoría de los suelos de la región del centro oeste son poco evolucionados siendo en general Molisoles (Udoles), aunque hay algunos Alfisoles (Udalfes). Típicamente, los primeros 20-30 cm de las series dominantes tienen de 3 a 5% de materia orgánica, 20 a 30% de arcilla (con predominancia de illita), pH entre 5.8 y 7, y no hay horizontes subsuperficiales con alto contenido de arcilla o impermeables. Casi todos los suelos eran originariamente muy deficientes en P, altos en K hacia el oeste y deficientes hacia el este. Sin embargo, las fertilizaciones durante muchos años han incrementado estos nutrientes a valores óptimos o altos y las deficiencias extremas ya no son comunes (Mallarino, 2001).

La soja comparte área con el maíz, rotando con éste y tomando parte de la fertilidad residual de este cultivo. La zona norte viene de inviernos con acumulación de nieve, lo que asegura una parte importante del agua al cultivo.

I.4.1.3. Argentina

Para caracterizar los distintos suelos de las provincias de Córdoba, Buenos Aires y Santa Fe se tomó como fuente el Atlas de Suelos de la República Argentina; Génesis, clasificación y cartografía de suelos (Cabria et al., 2012), y la publicación de Suelos y Ambientes de provincias Argentinas (Cruzate et al., 2008), realizándose una breve descripción de cada uno de los suelos.

I.4.1.3.1. Descripción de suelos de la Provincia de Córdoba

Los suelos de la provincia se agrupan en los siguientes órdenes (figura 14):

- Ardisoles
- Molisoles
- Entisoles
- Alfisoles

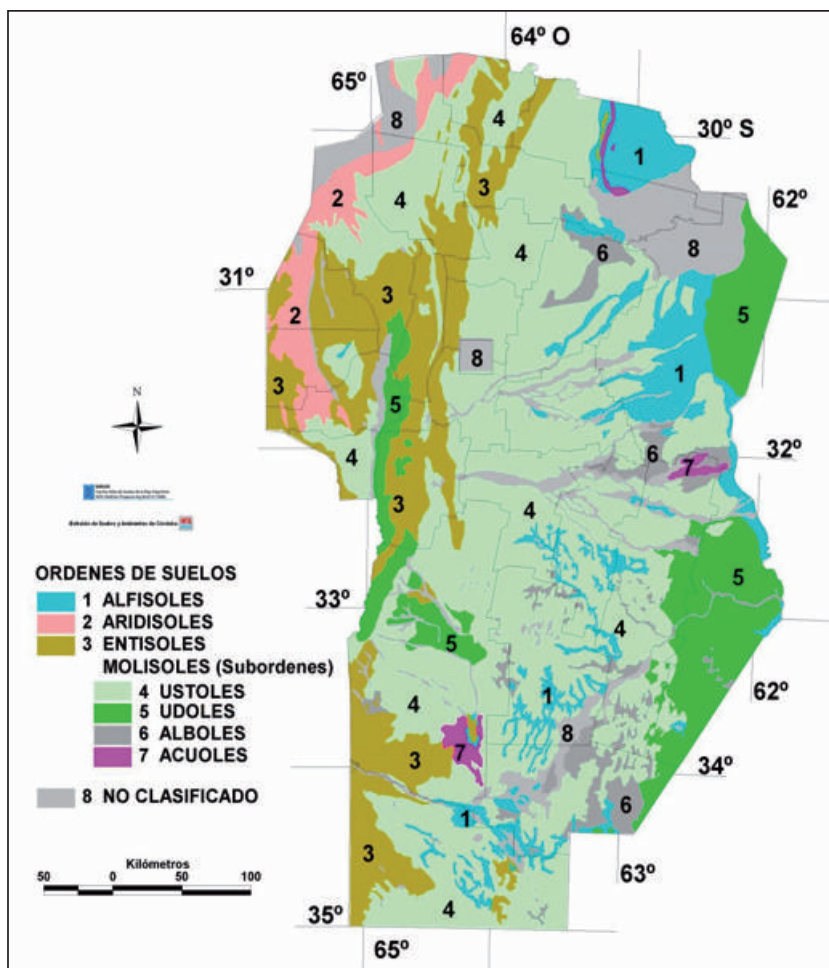


Figura 14. Suelos de la Provincia de Córdoba (INTA, Suelos y Ambientes de Córdoba).

Orden Aridisol: son los suelos de climas áridos ya sean fríos o cálidos, que no disponen durante largos períodos de agua suficiente para el crecimiento de cultivos o pasturas polifíticas. La mayor parte del tiempo el agua presente es retenida a gran tensión, lo que la hace prácticamente inutilizable para las plantas o bien es agua salada. No hay períodos superiores a los tres meses en el cual los suelos presentan humedad disponible, lo que limita extremadamente su posibilidad de utilización. En general estos suelos se caracterizan por un horizonte superficial claro y pobre en materia orgánica (epipedón ócrico) por debajo del cual pueden aparecer una gran variedad de caracteres morfológicos de acuerdo a las condiciones y a los materiales a partir de los que se han desarrollado. Estos caracteres pueden ser el resultado de las actuales condiciones de aridez o heredadas de condiciones anteriores y los procesos involucrados en su génesis incluyen la migración y acumulación de sales solubles, carbonatos y arcillas silicatadas o concentraciones de calcáreo o sílice.

Se han reconocido dos Subórdenes definidos para los Aridisoles: Argides y Ortides. Los primeros son suelos en los cuales se ha formado un horizonte iluvial de acumulación de arcillas silicatadas, la traslocación de arcillas en condiciones de un balance hídrico deficitario la mayor parte del año. Los segundos son aquellos suelos en que la principal característica es la ausencia de un horizonte de acumulación secundaria de arcilla, bien expresado. Pueden en cambio mostrar una gran variedad de otros caracteres tales como niveles de acumulación de sales solubles, de carbonatos de calcio o de yeso, o panes cementados.

Orden Molisol: son pardos oscuros, con horizontes superficiales poco profundos, de textura franco-arcillo-limosa, estructura granular y en bloques, bien provistos de materia orgánica (2-4%), seguidos de horizontes subsuperficiales más densos, arcillosos y poco permeables. Tienen muy buena fertilidad y condiciones físicas apropiadas para la producción de cultivos, pero presentan como limitante la susceptibilidad a la erosión hídrica.

Para la provincia de Córdoba, se reconocen cuatro subórdenes: Alboles, Acuoles, Udoles y Ustoles. Los suelos del suborden Alboles son aquellos que tienen un horizonte lavado por las fluctuaciones estacionales del agua que satura el suelo durante lapsos significativos. Ocupan áreas planas y vías de drenaje o depresiones cóncavas, receptoras del agua proveniente de partes altas del relieve circundante. El ambiente reductor predominante durante una parte del proceso y la infiltración paulatina del agua en el transcurso del tiempo, dan origen e un intensivo lavado, decoloración y empobrecimiento en nutrientes del denominado horizonte álbico. A raíz de dicho mecanismo y por debajo del horizonte citado tiene lugar una sustancial concentración de arcillas y coloides húmicos (horizonte argílico o nátrico) hecho que deriva finalmente en una disminución de la permeabilidad. Los Molisoles Acuoles son los que se han desarrollado en áreas bajas, depresiones anegables, terrazas, vías de avenamiento, cubetas, tendidos, que reciben aguas de las partes altas y están afectados por un exceso hídrico durante períodos prolongados (régimen ácuico). El agua que se infiltra alimenta la capa freática, fluctuando su nivel según la época del año y los aportes hídricos recibidos. Esta circunstancia imprime al perfil características de acentuado hidromorfismo (moteados contrastantes y tonalidades grises). Los suelos pertenecientes al suborden Udoles son aquellos de las regiones húmedas, que no están secos más de 90 días al año o 60 días consecutivos (régimen údico). Se encuentran en latitudes medias con temperaturas medias superiores a 8°C. Además del horizonte superficial oscuro y rico en materia orgánica (epipedón mólico) presenta otros horizontes subsuperficiales alterados o enriquecidos en arcilla (horizontes cámbico y argílico). Por último el suborden Ustoles agrupa suelos de climas subhúmedos a semiárido (régimen ústico) y temperaturas templadas y cálidas que se caracterizan por estar relativamente libres de los problemas de saturación con agua e hidromorfismo. Las sequías son frecuentes y las precipitaciones de carácter errático, aunque generalmente ocurren en la estación de crecimiento de los cultivos. Además del horizonte superficial oscuro pueden presentar diferentes horizontes subsuperficiales diagnósticos, como cámbico, argílico, nátrico y álbico.

Orden Entisol: son los suelos más recientes y menos desarrollados no presentando horizontes de diagnóstico ya que la actuación de los factores formadores ha sido escasa. La mayoría de ellos solamente tiene un horizonte superficial claro, de poco espesor y generalmente pobre en materia orgánica (epipedón ócrico).

Los subordenes reconocidos son: Acuentes, Fluventes, Psamentes y Ortentes. Los primeros son suelos donde existe un ambiente saturado permanentemente con agua, o en planicies de inundación de río o arroyos en los que la saturación ocurre en determinadas épocas del año. Los colores de los materiales son azulados o grises con moteados. Los Fluventes aparecen principalmente configurando las vegas de los ríos y arroyos en los que por aportes de estos, se han formado suelos aluviales, bien aireados, profundos y permeables que constituyen excelentes tierras de regadío. Los Psamentes son los suelos que forman los arenales y dunas, de amplia representación en todo el litoral, son suelos arenosos, silíceos y de bajo interés agrícola. Finalmente los Ortentes constituyen el suborden más representativo ocupando posiciones fisiográficas muy inestables, dando lugar a suelos poco profundos, erosionados y en general pobres en elementos minerales.

Orden Alfisol: suelos caracterizados por presentar un horizonte subsuperficial de enriquecimiento secundario de arcillas desarrollado en condiciones de acidez o de alcalinidad sódica, y asociado con un horizonte superficial claro, generalmente pobre en materia orgánica o de poco espesor. Los suelos que pertenecen al orden presentan una alta saturación con bases en todo el perfil.

Para esta provincia, se reconoce el suborden Acualfes; estos son los Alfisoles que se caracterizan por estar estacionalmente saturados con agua por períodos prolongados y asociados generalmente con una capa de agua freática fluctuante y cercana a la superficie. Las condiciones reductoras y la falta de oxigenación que afecta cíclicamente la zona de crecimiento radicular, quedan evidenciados en el perfil del suelo por coloraciones grisáceas y por la presencia de moteados de hierro. Normalmente los Acualfes se ubican en áreas planas o cóncavas expuestas a encharcamiento durante las épocas de lluvias dado el

escaso escurrimiento superficial y al aporte de aguas de escorrentía de sectores vecinos más elevados.

I.4.1.3.2. Descripción de suelos de la Provincia de Buenos Aires

Los suelos de la provincia se agrupan en los siguientes órdenes:

- Aridisoles
- Molisoles
- Alfisoles
- Entisoles
- Vertisoles

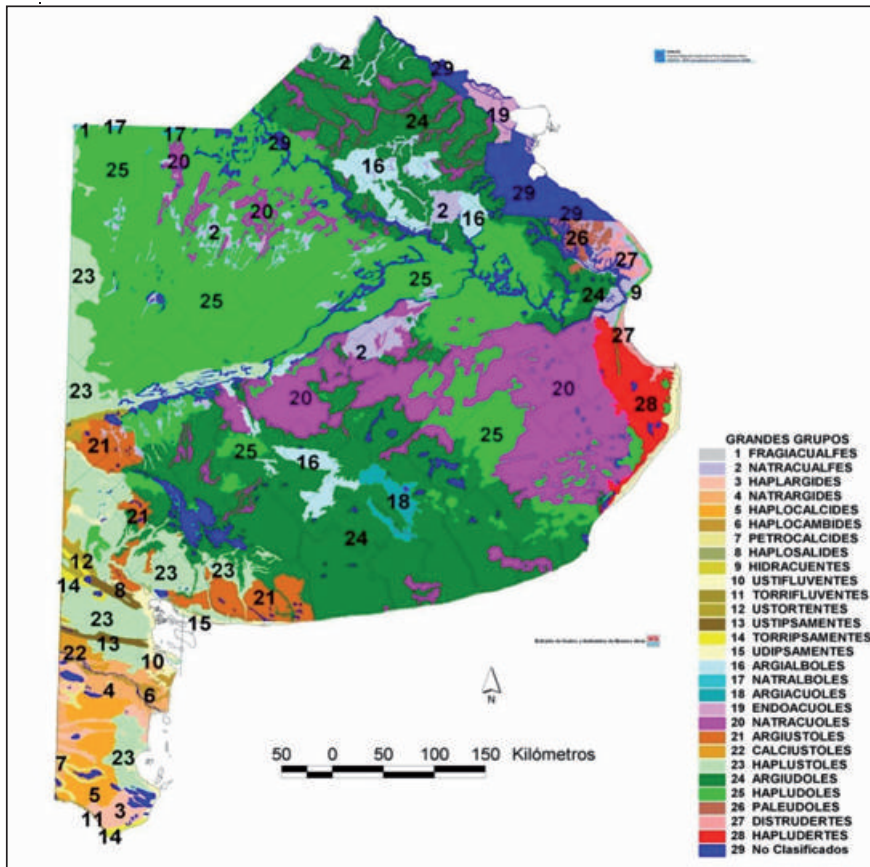


Figura 15. Suelos de la provincia de Buenos Aires (INTA, Suelos y Ambientes de Buenos Aires).

Orden Aridisol: como el nombre lo indica, son suelos que no tienen suficiente agua disponible para las plantas mesófitas. Durante la mayor parte del tiempo cuando el suelo está suficientemente cálido para el crecimiento, el agua del suelo se encuentra a potenciales más bajos que el punto de marchitez permanente, sea por deficiencia propiamente dicha, o por exceso de sales. No hay periodos de 90 días consecutivos con agua continuamente disponible para el crecimiento de las plantas. Muchos Aridisoles tienden a acumular y concentrar sales, debido al extremo desbalance existente entre la evapotranspiración y la precipitación. Los Aridisoles tienen un epipedón ócrico, y uno o más horizontes pedogenéticos que pueden haberse formado en el ambiente actual o pueden ser relictos de un periodo formador pluvial anterior. Los horizontes superficiales normalmente son de color claro con bajo tenor de materia orgánica y tienen consistencia mullida cuando están secos; si la textura es fina, los pedones individuales pueden ser duros. Los horizontes pedogenéticos pueden ser el resultado de la translocación y acumulación de sales, carbonatos y arcillas silicatadas o de la cementación por carbonatos o por sílice.

Para este orden se encontraron en la provincia los subórdenes Argides, Calcides, Cambides, Salides. El suborden Argides agrupa aquellos suelos en que la principal característica es la ausencia de un horizonte de acumulación secundaria de arcilla, bien expresado. Pueden en cambio mostrar una gran variedad de otros caracteres tales como niveles de acumulación de sales solubles, de carbonatos de calcio o de yeso, o panes cementados. Corresponden al suborden Argides, los Grandes Grupos Haplargides y Natrargides. Los primeros son los Argides que no presentan caracteres morfológicos diagnósticos aparte del horizonte de concentración secundaria de arcillas que define al Suborden, o bien el perfil está interrumpido por un nivel continuo de roca coherente que subyace muy próximo a la superficie. Generalmente hay un horizonte de acumulación de carbonato de calcio en el subsuelo aunque la porción superior del perfil se encuentra libre de calcáreo. Los Natrargides son suelos donde el complejo de intercambio a nivel del horizonte de acumulación iluvial está dominado por el catión sodio (horizonte nátrico). Normalmente este horizonte se encuentra fuertemente estructurado en

prismas o columnas y yace a unos pocos centímetros de la superficie. Por otro lado, no presentan horizontes cementados con carbonatos o con sílice, aunque pueden ser ricos en calcáreo y sales.

El suborden Calcides pertenece a los Aridisoles con horizonte cálcico o petrocálcico dentro de los 100 cm de profundidad. Corresponden a suelos Calcides los Grandes Grupos Haplocalcides y Petrocalcides. Los primeros son Aridisoles con horizontes cálcicos, mientras que los Petrocalcides, como su nombre lo indica son suelos con horizontes petrocálcicos, es decir, horizonte cálcico, continuo, cementado, o endurecido, cementado por carbonato cálcico y en algunas partes por carbonato cálcico y algo de carbonato magnésico.

El suborden Cambides agrupa suelos con horizonte subsuperficial cámbico, pertenece a este suborden el Gran Grupo Haplocambides, que son suelos con un horizonte alterado que carece de las propiedades diagnósticas de un horizonte árgico, o nátrico, o espódico, o ferrálico; no presenta colores oscuros y el contenido en materia orgánica es bajo.

El suborden Salides corresponde a Aridisoles que tienen horizonte sálico dentro de los 100 cm de profundidad. Pertenece a los suelos salides el Gran Grupo Haplosalides, éstos son típicamente suelos horizonte superficial muy pobre con acumulación de sales.

Orden Molisol: son básicamente suelos negros o pardos debido a la incorporación de materia orgánica, que se refleja más profundamente en la parte superficial, la que se denomina epipedón mólico. Otras propiedades que caracterizan a los Molisoles son: la estructura granular o migajosa moderada y fuerte que facilita el movimiento del agua y aire; la dominancia del catión calcio en el complejo de intercambio catiónico, que favorece la fluctuación de los coloides; la dominancia de arcillas, moderada a alta capacidad de intercambio y la elevada saturación con bases. Los Molisoles tienen muy buena fertilidad y condiciones físicas apropiadas para la producción de cultivos, pero presentan como limitante la susceptibilidad a la erosión hídrica.

Para la provincia de Buenos Aires, se reconocen los subórdenes Alboles, Acuoles, Udoles, Ustoles. Los suelos del suborden Alboles son aquellos que tienen un horizonte lavado por las fluctuaciones estacionales del

agua que satura el suelo durante lapsos significativos. Ocupan áreas planas y vías de drenaje o depresiones cóncavas, receptoras del agua proveniente de partes altas del relieve circundante. El ambiente reductor predominante durante una parte del proceso y la infiltración paulatina del agua en el transcurso del tiempo, dan origen a un intensivo lavado, decoloración y empobrecimiento en nutrientes del denominado horizonte álbico. A raíz de dicho mecanismo y por debajo del horizonte citado tiene lugar una sustancial concentración de arcillas y coloides húmicos (horizonte argílico o nátrico) hecho que deriva finalmente en una disminución de la permeabilidad. En los suelos alboles, se consideran los Grandes Grupos Argialboles y Natralboles. Los primeros son suelos que tienen un horizonte subsuperficial enriquecido en arcillas (argílico), pero sin altos contenidos de sodio de intercambio. Presenta concentraciones de arcilla y materia orgánica de color gris muy oscuro o negro en la parte superior. Es característico de estos suelos el déficit de humedad en una época del año. Los Natralboles son Alboles con elevado contenido de sodio (nátrico) y marcado hidromorfismo.

Los Molisoles Acuoles son los que se han desarrollado en áreas bajas, depresiones anegables, terrazas, vías de avenamiento, cubetas, tendidos, que reciben aguas de las partes altas y están afectados por un exceso hídrico durante períodos prolongados (régimen ácuico). El agua que se infiltra alimenta la capa freática, fluctuando su nivel según la época del año y los aportes hídricos recibidos. Esta circunstancia imprime al perfil características de acentuado hidromorfismo (moteados contrastantes y tonalidades grises). Pertenecen al suborden Acuoles los Grandes Grupos Argiacuoles, Endoacuoles y Natracuoles. Los primeros son los Acuoles que tienen un horizonte enriquecido en arcilla (argílico). Los Endoacuoles presentan endosaturación. No poseen horizontes argílico, nátrico, cálcico o duripán y pueden o no presentar un horizonte cámbico. Los últimos son los acuoles que tienen un elevado contenido de sodio de intercambio en el horizonte arcilloso (nátrico).

Los suelos pertenecientes al suborden Udoles son aquellos de las regiones húmedas, que no están secos más de 90 días al año o 60 días consecutivos (régimen údico). Se encuentran en latitudes medias con

temperaturas medias superiores a 8°C. Además del horizonte superficial oscuro y rico en materia orgánica (epipedón mólico) presenta otros horizontes subsuperficiales alterados o enriquecidos en arcilla (horizontes cámbico y argílico). Pertenecen a los Udoles, los Grandes Grupos Argiudoles, Hapludoles, Paleudoles. Los primeros tienen un horizonte enriquecido con arcilla iluvial (argílico), no demasiado espeso o cuyo contenido de arcilla decrece rápidamente con la profundidad. El horizonte superficial es negro o pardo muy oscuro, y el horizonte argílico es parduzco. Debajo puede encontrarse un horizonte con abundante calcio y carbonatos concentrados en concreciones duras, pero muchos no presentan calcáreo hasta profundidades considerables. Los Hapludoles son aquellos que generalmente tienen debajo del horizonte superficial oscuro (epipedón mólico) un horizonte de alteración poco enriquecido en arcilla (horizonte cámbico). Suelen tener abundante calcio pero los carbonatos están concentrados en concreciones duras. Los Paleudoles son los Udoles rojizos, profundos, que tienen un horizonte con alto contenido de arcilla que decrece muy poco con la profundidad.

Por último el suborden Ustoiles agrupa suelos de climas subhúmedos a semiárido (régimen ústico) y temperaturas templadas y cálidas que se caracterizan por estar relativamente libres de los problemas de saturación con agua e hidromorfismo. Las sequías son frecuentes y las precipitaciones, de carácter errático, aunque generalmente ocurren en la estación de crecimiento de los cultivos. Además del horizonte superficial oscuro, pueden presentar diferentes horizontes subsuperficiales diagnósticos, como cámbico, argílico, nátrico, álbico. Se citan para la provincia, los Grandes Grupos Argiustoles, Calciustoles y Haplustoles. Los Argiustoles tienen debajo del horizonte superficial oscuro (mólico) un horizonte enriquecido en arcilla (argílico). La mayoría tienen un régimen climático subhúmedo o semiárido, pero algunos son marginales a los climas áridos, mientras que otros se aproximan a los climas más húmedos. Los Calciustoles presentan dentro del 1,50 m de profundidad un horizonte rico en calcio (cálcico) que puede estar fuertemente cementado (petrocálcico). Además se encuentra calcáreo en todos los otros horizontes del suelo. Los Haplustoles son los suelos que además de los requisitos de Ustoiles tienen, inmediatamente debajo del horizonte superficial oscuro, un horizonte

que consiste únicamente de materiales minerales ligeramente alterados. Muchos, también tienen horizontes de acumulación de carbonatos o sales.

Orden Alfisol: son suelos a los que se denomina comúnmente suelos “lavados” debido a sus horizontes superficiales (15 cm o menos), de colores claros y estructura masiva o muy fuerte, generalmente pobre en materia orgánica seguido de horizontes muy arcillosos, que constituyen un horizonte argílico fuertemente desarrollado. A nivel de Suborden encontramos los suelos “Acuafes”, que se caracterizan por estar estacionalmente saturados con agua por períodos prolongados y asociados generalmente con una capa de agua freática fluctuante y cercana a la superficie. Las condiciones reductoras y la falta de oxigenación que afecta cíclicamente la zona de crecimiento radicular, quedan evidenciados en el perfil del suelo por coloraciones grisáceas y por la presencia de moteados de hierro. Corresponden a este suelo los Grandes Grupos Fragiacuafes y Natracuafes. Los primeros se caracterizan por la presencia de un horizonte denso y quebradizo cuando húmedo pero que se torna muy duro y con aspecto cementado en seco (fragipán). Este horizonte representa un impedimento para el movimiento vertical del agua por lo que se satura en épocas de lluvias y, si se encuentra a poca profundidad puede resultar una limitación de índole física para el desarrollo de las raíces de las plantas. Los Natracuafes son suelos con un complejo de intercambio rico en cationes de sodio a nivel del horizonte iluvial de acumulación secundaria de arcillas (horizonte nátrico). Las malas condiciones físicas derivadas de la dominancia del sodio afectan el desarrollo radicular, la oxigenación de la atmósfera edáfica y el movimiento vertical del agua en el perfil.

Orden Entisol: son los suelos que no evidencian o tienen escaso desarrollo de horizontes pedogenéticos. La mayoría de ellos solamente tiene un horizonte superficial claro, de poco espesor y generalmente pobre en materia orgánica (epipedón ótrico). Normalmente no se presentan otros horizontes diagnósticos, lo que se debe en gran parte al escaso tiempo transcurrido desde la acumulación de los materiales parentales. Son suelos profundos, de textura arenosa a areno-franca, sin distinción de horizontes. A

veces presentan un horizonte débil y algo más oscuro debido a una mayor actividad biológica. El contenido de arcilla de dicho horizonte es muy bajo y varía entre el 5 y el 12%, aunque parte de ese porcentaje puede corresponder a sesquióxidos de hierro y aluminio libres, sobre todo en aquellos suelos que tienen colores más rojos. La capacidad de intercambio catiónico es baja; son suelos de muy baja fertilidad, muy permeables y que rápidamente sufren déficit hídrico. Poseen una permeabilidad muy lenta, retienen abundante agua, y son penetrables con moderada facilidad por las raíces. Muchos de estos suelos se encuentran erosionados, algunos en forma severa. A nivel de Suborden se distinguen suelos Acuentes, Fluventes, Psamentes y Ortentes.

Los Acuentes son suelos donde existe un ambiente saturado permanentemente con agua o depósitos arenosos muy húmedos. Los colores de los materiales son azulados o grises con moteados. Pertenece a este suborden el Gran Grupo Hidracuentes, que son suelos arcillosos que están permanentemente saturados con agua, con un color frecuentemente que va del gris azulado al gris verduzco.

Los Fluventes están afectados frecuentemente por inundaciones, pero no están permanentemente saturados con agua, muestran ausencia de rasgos asociados con la humedad, los cuales están presentes en suelos más mojados como los Acuentes. Pertenecen a estos suelos los Grandes Grupos Ustifluventes y Torrifluventes. Los primeros son los Fluventes de climas subhúmedos (en régimen ústico). Se encuentran en los planos aluviales de ríos y arroyos. Generalmente están anegados en alguna estación del año. Los segundos son los Fluventes de clima árido que no están inundados frecuentemente o por largos períodos. La mayoría son alcalinos o calcáreos y en ciertos sitios salinos. Los Psamentes son los suelos dominantes en los depósitos de arenas estabilizadas o móviles de las dunas y médanos, de bajo interés agrícola. La capa de agua se encuentra generalmente a profundidades mayores a los 50 cm. Tienen baja capacidad de retención de humedad. Pertenecen a este suborden los Grandes Grupos Ustipsamentes, Torripsamentes y Udipsamentes. Los primeros son los Psamentes de regiones semiáridas y subhúmedas, que tienen en la fracción arena y cantidad abundante de material meteorizable. Los Torripsamentes son los Psamentes

de climas áridos ubicados en los relieves medanosos móviles o estabilizados. Y por último los Udipsamientos son los Psamientos de regiones húmedas que tienen en la fracción arenosa una apreciable cantidad de materiales meteorizables.

Los Ortentes son Entisoles formados, básicamente, en superficies recientemente erosionadas. Los horizontes diagnósticos están ausentes o han sido truncados. Para este suborden se cita el Gran Grupo Ustortentes que son los suelos de climas semiáridos, de ambientes de relieve pronunciado o en cauces y llanuras aluviales donde se acumula material de arrastre. Son suelos areno-pedregosos formados sobre acumulaciones de material grueso. Los ubicados en las partes bajas presentan deficiencias de drenaje.

Orden Vertisol: abarca los suelos muy ricos en arcillas expandibles consecuencia de lo cual se agrietan fuertemente la mayoría de los años durante la estación seca. Además, poseen una alta densidad, agregados cuneiformes y otros caracteres estructurales que resultan de los desplazamientos (contracción y expansión interna). Existe un conjunto de rasgos que si bien no son taxonómicamente definitorios, se presentan con frecuencia en los Vertisoles tales como una fuerte estructura granular en la porción superior del suelo; microrelieve ondulado (gilgai); pocas evidencias de meteorización o de eluviación-iluviación; ser extremadamente plásticos cuando están húmedos; complejo de intercambio dominado por calcio o calcio y magnesio y coloraciones neutras u oscuras. El uso y manejo de los Vertisoles está altamente condicionado por la riqueza y naturaleza de las arcillas y la consecuente baja permeabilidad cuando están húmedos. Sin embargo, las primeras lluvias después de la estación seca llegan a infiltrar en el suelo a través de las grietas que se forman en los suelos secos. Dentro de este orden, encontramos en la provincia de Buenos Aires el suborden orden Udertes. Estos son suelos que están húmedos la mayor parte del año. La estación seca es relativamente corta y las grietas no están abiertas por períodos muy prolongados (menos de tres meses al año). Diferenciamos para los Udertes los Grandes Grupos Distrudertes y Hapludertes. Los primeros son suelos pobres

en materia orgánica y con baja saturación con bases. Los hapludertes son vertisoles que si bien pertenecen a un régimen údico, están mejor drenados.

I.4.1.3.3. Descripción de suelos de la Provincia de Santa Fe

Los suelos de la provincia se agrupan en los órdenes:

Alfisoles

Molisoles

Entisoles

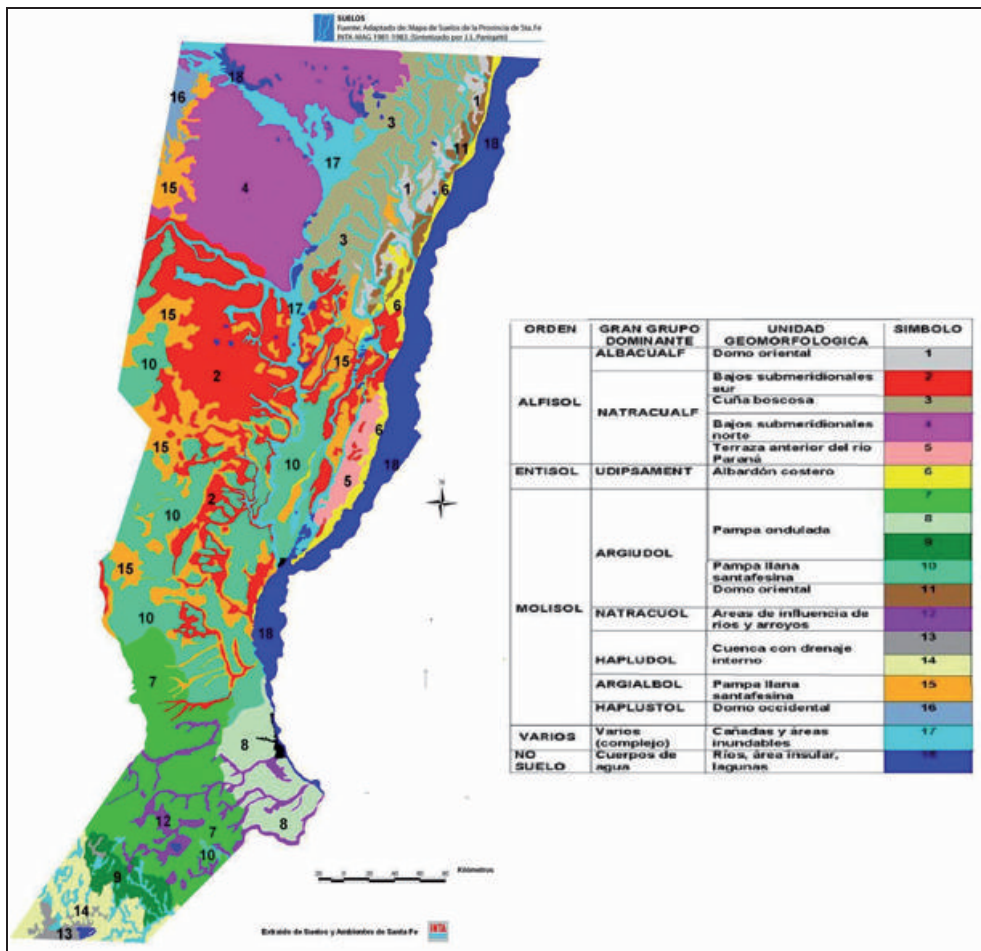


Figura 16. Suelos de la provincia de Santa Fe (INTA, Suelos y Ambientes de Santa Fe).

Orden Alfisol: suelos que se caracterizan por presentar un horizonte subsuperficial de enriquecimiento secundario de arcillas desarrollado en condiciones de acidez o de alcalinidad sódica, se los denomina suelos “lavados” ya que están asociados con un horizonte superficial claro, generalmente pobre en materia orgánica o de poco espesor. Los suelos que pertenecen al Orden presentan una alta saturación con bases en todo el perfil. A nivel de Suborden encontramos los suelos “Acuafes” que se caracterizan por estar estacionalmente saturados con agua por períodos prolongados y asociados generalmente con una capa de agua freática fluctuante y cercana a la superficie. Las condiciones reductoras y la falta de oxigenación que afecta cíclicamente la zona de crecimiento radicular, quedan evidenciados en el perfil del suelo por coloraciones grisáceas y por la presencia de moteados de hierro. Se diferencian los Grandes Grupos Albacuafes y Natracuafes. Los primeros tienen un horizonte fuertemente lavado y decolorado (horizonte álbico) cuyo contenido en arcillas es marcadamente inferior al del horizonte subyacente, presentando una baja permeabilidad del horizonte iluvial. El Gran Grupo Natracuafes se caracterizan principalmente por tener el complejo de intercambio rico en cationes de sodio a nivel del horizonte iluvial de acumulación secundaria de arcillas (horizonte nátrico). Las malas condiciones físicas derivadas de la dominancia del sodio afectan el desarrollo radicular, la oxigenación de la atmósfera edáfica y el movimiento vertical del agua en el perfil.

Orden Molisol: son suelos negros o pardos debido a la incorporación de materia orgánica, que se refleja más profundamente en la parte superficial, la que se denomina epipedón mólico. Otras propiedades que caracterizan a los Molisoles son: la estructura granular o migajosa moderada y fuerte que facilita el movimiento del agua y aire; la dominancia del catión calcio en el complejo de intercambio catiónico, que favorece la fluctuación de los coloides; la dominancia de arcillas, moderada a alta capacidad de intercambio y la elevada saturación con bases. Los Molisoles tienen muy buena fertilidad y condiciones físicas apropiadas para la producción de cultivos, pero presentan como limitante la susceptibilidad a la erosión hídrica.

A nivel de suborden se reconocen cuatro tipos de suelos: Alboles, Acuoles, Udoles, Ustoles.

Los suelos del suborden Alboles son aquellos que tienen un horizonte lavado por las fluctuaciones estacionales del agua que satura el suelo durante lapsos significativos. Ocupan áreas planas y vías de drenaje o depresiones cóncavas, receptoras del agua proveniente de partes altas del relieve circundante. El ambiente reductor predominante durante una parte del proceso y la infiltración paulatina del agua en el transcurso del tiempo, dan origen e un intenso lavado, decoloración y empobrecimiento en nutrientes del denominado horizonte álbico. A raíz de dicho mecanismo y por debajo del horizonte citado tiene lugar una sustancial concentración de arcillas y coloides húmicos (horizonte argílico o nátrico) hecho que deriva finalmente en una disminución de la permeabilidad. Se considera para este suborden el Gran Grupo Argialboles; estos son suelos que tienen un horizonte subsuperficial enriquecido en arcillas (argílico), pero sin altos contenidos de sodio de intercambio. Presenta concentraciones de arcilla y materia orgánica de color gris muy oscuro o negro en la parte superior. Es característico de estos suelos el déficit de humedad en una época del año.

Los Molisoles Acuoles son los que se han desarrollado en áreas bajas, depresiones anegables, terrazas, vías de avenamiento, cubetas, tendidos, que reciben aguas de las partes altas y están afectados por un exceso hídrico durante períodos prolongados (régimen ácuico). El agua que se infiltra alimenta la capa freática, fluctuando su nivel según la época del año y los aportes hídricos recibidos. Esta circunstancia imprime al perfil características de acentuado hidromorfismo (moteados contrastantes y tonalidades grises). Pertenece al suborden Acuoles el Gran Grupo Natracuoles, que son los acuoles que tienen un elevado contenido de sodio de intercambio en el horizonte arcilloso (nátrico).

Los suelos pertenecientes al suborden Udoles son aquellos de las regiones húmedas, que no están secos más de 90 días al año o 60 días consecutivos (régimen údico). Se encuentran en latitudes medias con temperaturas medias superiores a 8°C. Además del horizonte superficial oscuro y rico en materia orgánica (epipedón mólico) presenta otros horizontes

subsuperficiales alterados o enriquecidos en arcilla (horizontes cámbico y argílico). Pertenecen a suelos Udoles los Grandes Grupos Argiudoles y Hapludoles. Los primeros tienen un horizonte enriquecido con arcilla iluvial (argílico), no demasiado espeso o cuyo contenido de arcilla decrece rápidamente con la profundidad. El horizonte superficial es negro o pardo muy oscuro, y el horizonte argílico es parduzco. Debajo puede encontrarse un horizonte con abundante calcio y carbonatos concentrados en concreciones duras, pero muchos no presentan calcáreo hasta profundidades considerables. Los Hapludoles son aquellos que generalmente tienen debajo del horizonte superficial oscuro (epipedón mólico) un horizonte de alteración poco enriquecido en arcilla (horizonte cámbico). Suelen tener abundante calcio pero los carbonatos están concentrados en concreciones duras.

Por último el suborden Ustoles agrupa suelos de climas subhúmedos a semiárido (régimen ústico) y temperaturas templadas y cálidas que se caracterizan por estar relativamente libres de los problemas de saturación con agua e hidromorfismo. Las sequías son frecuentes y las precipitaciones, de carácter errático, aunque generalmente ocurren en la estación de crecimiento de los cultivos. Además del horizonte superficial oscuro, pueden presentar diferentes horizontes subsuperficiales diagnósticos, como cámbico, argílico, nátrico, albico. Se cita para suelos Ustoles, el Gran Grupo Haplustol, que son los suelos que además de los requisitos de Ustoles tienen, inmediatamente debajo del horizonte superficial oscuro, un horizonte que consiste únicamente de materiales minerales ligeramente alterados. Muchos, también tienen horizontes de acumulación de carbonatos o sales.

Orden Entisol: son los suelos que no evidencian o tienen escaso desarrollo de horizontes pedogenéticos. La mayoría de ellos solamente tiene un horizonte superficial claro, de poco espesor y generalmente pobre en materia orgánica (epipedón ócrico). Normalmente no se presentan otros horizontes diagnósticos, lo que se debe en gran parte al escaso tiempo transcurrido desde la acumulación de los materiales parentelas. Son suelos profundos, de textura arenosa a arena-franca, sin distinción de horizontes. A veces presentan un horizonte débil y algo más oscuro debido a una mayor

actividad biológica. El contenido de arcilla de dicho horizonte es muy bajo y varía entre el 5 y el 12%, aunque parte de ese porcentaje puede corresponder a sesquióxidos de hierro y aluminio libres, sobre todo en aquellos suelos que tienen colores más rojos. La capacidad de intercambio catiónico es baja, son suelos de muy baja fertilidad, muy permeables y que rápidamente sufren déficit hídrico. Poseen una permeabilidad muy lenta, retienen abundante agua, y son penetrables con moderada facilidad por las raíces. Muchos de estos suelos se encuentran erosionados, algunos en forma severa.

A nivel de Suborden se distingue para esta provincia los suelos Psamentes; estos son los suelos dominantes en los depósitos de arenas estabilizadas o móviles de las dunas y médanos, de bajo interés agrícola. La capa de agua se encuentra generalmente a profundidades mayores a los 50 cm. Tienen baja capacidad de retención de humedad. A nivel de Gran Grupo encontramos los Udipsamentes; estos son los Psamentes de regiones húmedas que tienen en la fracción arenosa una apreciable cantidad de materiales meteorizables.

I.5. Diagnóstico de Fertilidad, situación actual

En la actualidad existen en el país métodos diagnósticos a nivel de suelo para determinar la probabilidad de respuesta a Fósforo. Fontanetto et al. (2011) mencionan que la utilización del método de extracción de Bray y Kurtz I, de muestras de 0 a 20 cm de profundidad, es una buena herramienta para la recomendación de fertilización a partir de la relación que se ha desarrollado en diferentes partes de Argentina, de este valor con la respuesta en rendimiento al que se denomina nivel crítico. Por ejemplo, para suelos del centro de Santa Fe, este valor es de 17 mg kg^{-1} , y los autores mencionan que este valor puede ser menor a medida que cae el rendimiento del cultivo. El proyecto fertilizar-INTA 2001, en una compilación de resultados, determina un nivel crítico de 9 mg kg^{-1} para la región pampeana central citado por Gutiérrez y Scheiner (2015). Esta amplitud en los niveles críticos dificulta poder claramente evaluar el nivel nutricional del cultivo; si bien en estos últimos años se han agregado otros análisis químicos para determinar además de la disponibilidad de P en el suelo, factores relacionados a su dinámica, como la capacidad buffer de fosfato de los suelos, fósforo remanente, con la idea de evaluar la velocidad con la que un suelo puede proveer de fósforo al cultivo, no existen trabajos donde se determina a nivel de planta cual es el estado nutricional.

Otro de los nutrientes que se han estudiado es el azufre, a partir de síntomas de deficiencia reportados por Martínez y Cordone (1998). También estos autores observaron que las mayores respuestas a este nutriente se encontraban en aquellos suelos con bajo contenido de materia orgánica. Para conocer la disponibilidad de azufre, se puede utilizar el análisis de SO_4^{-2} , tomando como valor crítico 10 mg kg^{-1} propuesto por Messik (1992). Diferentes ensayos han sido llevados adelante en suelos de variadas regiones, encontrando variación o nula respuesta, aún en suelos con valores menores a 10 mg kg^{-1} . Resultados informados en la región templada de Argentina mostraron que parte de las variaciones en la respuesta al agregado de azufre serían explicadas por diferencias en la capacidad de mineralización de los suelos (Díaz Zorita y col., 2002). Los sistemas actuales de recomendación, no logran hacer diagnósticos certeros, pero solamente se ha trabajado con análisis

de suelo y existen pocas referencias acerca de los valores objetivo para una buena nutrición del cultivo a nivel foliar o de planta.

Con respecto al calcio, Vivas y Fontanetto (2004) reportaron respuesta al agregado de Ca, de P y de S para la zona de Videla (Santa Fe). Los resultados mostraron la respuesta positiva al agregado de Ca y la misma se debió a su efecto como nutriente (no como enmienda del suelo), ya que el % de Ca del complejo de intercambio era de 58%, nivel considerado bajo por diferentes investigaciones realizadas en otros países (Thomas y Hargrove, 1984). Experiencias efectuadas en la campaña 2007/08 (Fontanetto et al., 2008) sobre suelos con niveles de Ca de intercambio inferiores a 57%, demostraron que las dosis mínimas de Ca para lograr altas producciones de soja de primera fueron de 100 a 120 kg ha⁻¹. Este tipo de respuesta y recomendaciones son utilizadas en pequeñas áreas de Argentina, no existiendo en la actualidad validación de respuesta en otras zonas y solo se observa el análisis del suelo como método diagnóstico.

Las deficiencias de micronutrientes son menos impactantes que para el N, el P y el S en la región pampeana Argentina, pero experiencias realizadas en diferentes regiones del país mostraron resultados positivos para el caso del Mo, el B, el Mn y el Zn (Ferraris et al., 2005). No existen métodos diagnóstico para poder determinar la probabilidad de respuesta y diferentes autores han encontrado respuesta a uno u otro micronutriente. Han sido tomado niveles críticos de suelo de la bibliografía internacional, pero hasta el momento no se han publicado validaciones locales, encontrando una gran variabilidad en la respuesta.

El avance observado en el país sobre el estatus nutricional del cultivo es incipiente y solo se ha trabajado con algunos nutrientes, por lo que existe la necesidad de disponer de herramientas que permitan evaluar el estado nutricional del cultivo con todos los nutrientes involucrados. El análisis foliar sería una buena herramienta, ya que estamos tomando a la misma planta como extractora de nutrientes del suelo y a partir de esta información conocer el estado nutricional del cultivo.

I.6. Diagnóstico del estado nutricional mediante análisis de tejidos

I.6.1. Análisis Foliar

El análisis foliar se presenta como una herramienta que permite valorar en forma directa el grado de nutrición del cultivo, ya que las hojas, por su actividad metabólica, representan fehacientemente lo que pueden extraer de un suelo. Aquí no existe la interferencia del suelo sobre los diferentes extractantes químicos utilizados en análisis de suelos, que buscan relacionar mediante su acción la absorción de nutrientes por los cultivos.

La composición química de las hojas varía en el tiempo asociada a su grado de maduración, por lo que es necesario determinar cuál es el momento del muestreo como así también cuáles hojas deben ser colectadas para su análisis.

La mayor ventaja del diagnóstico foliar es que, al tomar a la propia planta como solución extractora (Malavolta et al., 1997), permite una evaluación directa de su estado nutricional e indirecto de la fertilidad del suelo.

La metodología clásica para estimar deficiencias nutricionales en los cultivos utilizando análisis foliares se basa en comparaciones de la concentración foliar de nutrientes en la muestra contra un valor crítico o rango de suficiencia. Sin embargo la concentración de nutrientes en las hojas depende de varios factores como la etapa fenológica, la posición de la hoja en la planta, la variedad del cultivo y el tipo de suelo, entre otros. Este método llamado Nivel crítico o Rango de suficiencia (métodos estáticos) requiere ser ajustado localmente a fin de poder interpretar correctamente el nivel nutricional del cultivo y en general se toman tablas de referencias que corresponden a otros sitios y es ahí donde el método pierde ajuste. También cuando se logran ajustar localmente es necesario seguir correctamente el momento de muestreo, ya que la edad de los tejidos afecta la concentración de nutrientes, que varía durante el ciclo de vida del vegetal y hay condiciones, por ejemplo alta radiación, que provocan una baja concentración de nutriente en la hoja,

explicado por un importante aumento de la biomasa, mientras que con baja radiación pueden encontrarse altas concentraciones al ser baja o nula la acumulación de biomasa.

En el país existen escasos trabajos sobre los rangos de suficiencia de nutrientes y además, esos resultados fueron obtenidos sobre ensayos de respuesta a la fertilización. No se dispone de un patrón nutricional obtenido en condiciones reales de producción para áreas productivas con distinto potencial de rendimiento (Cordone et al., 2007).

Para poder evaluar el nivel nutricional de los cultivos es necesario la utilización de métodos diagnósticos que no solo tengan en cuenta la concentración absoluta de cada nutriente sino la relación entre ellos, tratando de contemplar todos los factores que afectan el rendimiento de los cultivos.

Por todo esto y para poder valorar la nutrición de los cultivos es necesario la utilización de métodos dinámicos, donde no sólo se utilice la concentración de un nutriente, sino pares de ellos o relaciones donde podemos mencionar el *"Balance nutriente evolutivo"*, propuesto por Carpena (1982) o *"Diagnosis and Recommendation Integrated System"* (DRIS) desarrollado por Beaufilet (1973) y recientemente el *"Compositional Nutrient Diagnosis"* (DOP) (Parents et al., 1992). Todos ellos intentan mejorar el diagnóstico respecto a la edad de la planta, efectos de dilución y concentración, además de las interacciones entre nutrientes (Lucena et al., 2002). De estos métodos, el más utilizado para evaluar el estado nutricional de los cultivos es DRIS.

I.6.2. Método DRIS (Diagnosis and Recommendation Integrated System)

I.6.2.1. Fundamento

El DRIS se basa en la ley de Liebig o del mínimo, la cual establece que el rendimiento máximo posible es función directa del factor más limitante de acuerdo a las necesidades del cultivo. También se basa en la ley Mitscherlich o de los rendimientos decrecientes, ley que se fundamenta en que el rendimiento puede incrementarse por efecto de cada uno de los factores, siempre y cuando no estén presentes en sus niveles subóptimos o mínimos (Sumner y Farina, 1986).

Beaufils (1973) presenta el DRIS como una alternativa al método clásico experimental de campo consistente en comparar el efecto de varios tratamientos, en razón de las dificultades y limitaciones que introducen en estos experimentos la acción de numerosos factores incontrolables y no evaluados, los cuales son meramente incluidos como estimaciones de error experimental.

Dentro de estas limitaciones menciona que:

a) Los efectos observados como consecuencia de las respuestas de las plantas a los fertilizantes, constituyen el resultado de una compleja cadena de reacciones, generalmente no definidas o conocidas.

b) Dichas reacciones son determinadas por las características particulares del sitio de experimentación, las cuales nunca podrían ser exactamente reproducidas en el tiempo y en el espacio, características que sí podrían ser reproducidas, bajo las condiciones de un experimento de laboratorio. Debido a estas dificultades los resultados y condiciones logradas en un determinado sitio experimental, muy raramente pueden ser extrapolados.

c) Debido a que sólo muy pocos factores pueden ser variados simultáneamente en los experimentos de campo (usualmente N, P y K en forma de fertilizante compuesto), los resultados y conclusiones obtenidos podrían estar tergiversados, debido a la actuación de un factor desconocido, no

determinado, descartado o insospechado, que actuase como un factor limitante.

d) Puede existir la ocurrencia de un factor adverso accidental, que reste valor a la información.

e) También hay que considerar los requerimientos de repetición en el tiempo y en el espacio, propio de los experimentos de campo, que hacen que estos sean numerosos y consumidores de mucho tiempo.

Como conclusión a todas esas limitantes, Beaufils (1973), indica que éstas podrían alterar los resultados y restringir la experimentación. Como consecuencia, una gran proporción de los experimentos de campo, no tendrían utilidad o aun peor, causarían más desorientación que una adecuada referencia.

Según Sumner (1977), el DRIS consiste en un conjunto integrado de normas, desarrolladas para evaluar el estado nutricional de un cultivo. Estas normas representan las calibraciones de la composición del tejido de la planta, la composición del suelo, los parámetros del medio ambiente y las prácticas culturales, como funciones de la producción obtenida por un cultivo en particular. Por lo tanto, el DRIS integra más íntimamente el balance nutricional de la planta y el suelo e incorpora aún, otros factores tales como, la edad de la planta y el clima en el diagnóstico, permitiendo así hacer recomendaciones confiables sobre el manejo de los cultivos.

Evaluar el estado nutricional consiste en realizar una comparación entre una muestra cualquiera y un patrón o estándar de comparación, el cual ha sido denominado como norma (Malavolta et al., 1997).

Malavolta et al. (1997), definen como plantas "normales" a aquellas que teniendo en sus tejidos todos los elementos en cantidades y proporciones adecuadas, son de alta producción y presentan una apariencia externa sana.

Rodríguez et al. (2000), atribuyen la rápida adopción y difusión del DRIS, a sus variadas ventajas en términos de economía de recursos y del tiempo necesario para el desarrollo de normas de diagnóstico. Otras características del DRIS son sus sólidos basamentos conceptuales, fisiológicos y su relativa simplicidad metodológica.

I.6.2.2. Ventajas del sistema DRIS

1- Permite realizar un orden de requerimiento nutricional de acuerdo a los niveles de cada nutriente en el cultivo.

2- Permite realizar un diagnóstico nutricional rápido, con el cultivo ya implantado y en cualquier momento de su desarrollo.

3- El rápido diagnóstico permite el accionar en la fertilización en el momento en que el cultivo lo requiere.

4- Son consideradas las interacciones entre nutrientes, lo que maximiza el grado de ajuste del sistema.

I.6.2.3. Efectos de diferentes variables sobre las normas DRIS

Según Rodríguez y Rodríguez (2000), las normas DRIS se relacionan a tres variables:

a) Con relación a la posición de la hoja muestreada: Walworth y Sumner (1987) encontraron que al realizar el diagnóstico con el sistema DRIS en hojas de maíz de variada posición dentro de la planta, sólo ocurrieron variaciones menores en el diagnóstico y el nutriente diagnosticado como más necesitado siempre resultó altamente independiente de la posición de la hoja analizada.

b) Con relación a la edad: Sumner (1977) realizó el diagnóstico del follaje de maíz y de soja mediante el método DRIS, con plantas de una gran variedad de edades, de localidades y de posiciones de la hoja en la planta y reportó que no ocurrieron cambios significativos en el orden de requerimiento diagnosticado de los nutrientes. Con base a estos estudios (Walworth y Sumner, 1987) expresan que el DRIS, puede minimizar en muchos casos las limitaciones causadas por la edad del tejido muestreado, limitaciones

consideradas como las más severas para otros sistemas de diagnóstico. Según estos autores, el problema de la edad del tejido ha sido solucionado por el DRIS, ya que este sistema utiliza relaciones entre nutrientes en lugar de valores críticos para hacer el diagnóstico. En la medida que la planta madura, los tejidos contienen mayor proporción de materia seca que de humedad y nutrientes, por consiguiente, al expresar la concentración de nutrientes en función del contenido de materia seca (MS), el valor decrece en el tiempo, por ejemplo, $N (\%) = 100N/MS$. Sin embargo, al usar las relaciones entre nutrientes, como ejemplo, $N/P = (100N/MS)/(100P/MS)$, se cancela la MS y la relación N/P se vuelve menos dependiente de los cambios relativos en MS con la edad. Esto permite una mayor flexibilidad en el momento de muestreo y un período mayor de tiempo para realizar el diagnóstico.

c) Con relación a la ubicación geográfica: fue realizada una comparación, entre las normas DRIS para caña de azúcar derivadas de datos generados en suelos contrastantes de Florida, EE.UU. y Sur África (Walworth y Sumner, 1987). Fue determinado que a pesar de las grandes diferencias en condiciones edáficas y ambientales, las normas derivadas promediando los valores de los dos grupos de plantas más productivas, resultaron virtualmente idénticas.

Sin embargo, existen normas internacionales usadas, por ejemplo para trigo, obtenidas de un banco de datos provenientes de trabajos de varios años y aplicadas en diferentes estudios (Sumner, 1981; Beverly 1993), donde se observaron importantes diferencias en las normas desarrolladas en diversas regiones del mundo; esto debido a diferencias edáficas, genéticas y ambientales (Dara et al., 1990; Hallmark et al., 1990; Rasmussen, 1996). Reis (2002) se suma a este debate, afirmando que las normas DRIS pueden diferir según los autores en función de las poblaciones evaluadas, dado que pueden ser desarrolladas en diferentes situaciones de balance óptimo. De la misma manera al comparar normas ya publicadas para soja en Estados Unidos (Beverly y Sumner, 1986), en Rio Grande del Sur (Castamann, 2009) y en Mato Grosso del Sur (Hissao Kurihara, 2004) se encontraron importantes diferencias.

Por lo tanto, para mejorar la precisión del diagnóstico por DRIS, sería necesario establecer normas de estudios locales que tomen en cuenta la variabilidad de la región.

I.6.2.4. Normas DRIS

Para desarrollar las normas DRIS de una región, se debe utilizar una muestra representativa de un gran número de sitios al azar, que pueden ser campos comerciales y/o parcelas experimentales bajo diferentes condiciones ambientales y de manejo. Se deben tomar muestras de hojas para su análisis y registrar el rendimiento (Sumner, 1986). Las normas basadas en un banco de datos grande, son probablemente más representativas, ya que abarcan un amplio espectro de variabilidad en la población (Letzsch, 1984).

El DRIS, se ha usado como una metodología de diagnóstico nutricional en varios cultivos. Las normas DRIS son las medias de relaciones o formas de expresión de la composición del tejido foliar, con sus respectivas varianzas y coeficientes de variación, de una subpoblación de observaciones de alto rendimiento (Letzsch, 1984).

Letzsch y Sumner (1984), indican que las mejores normas DRIS, son las que tienen un gran número de observaciones obtenidas al azar, con un límite alto de rendimiento para dividir las dos subpoblaciones (de bajo y alto rendimiento) y que tenga al menos un 10% de observaciones de alto rendimiento.

CAPITULO II

II.- Objetivos e hipótesis

A partir de la revisión de antecedentes y su justificación, se plantean los objetivos e hipótesis de la tesis, referidos a la necesidad de evaluar el estado nutricional del cultivo de soja en el área núcleo de producción en Argentina, el desarrollo de normas DRIS, el cálculo de los índices de nutrientes y la generación de tablas de referencias y rangos locales de interpretación de nutrientes.

II.1. Objetivos

II.1.1. Objetivo General

- Evaluar el estado nutricional del cultivo de soja en la zona núcleo de Argentina.

II.1.2. Objetivos específicos

- Interpretar los valores de concentración foliar de nutrientes, para diferentes ambientes (Provincias), con tablas de referencia regionales.
- Generar rangos locales de interpretación de nutrientes.
- Desarrollar normas DRIS para soja en Argentina a partir de una población de altos rendimientos.
- Calcular los índices de nutrientes DRIS, el índice de balance nutricional y el orden de requerimiento nutricional.

II.2. Hipótesis

El análisis foliar interpretado por la metodología DRIS, permite conocer el estado nutricional del cultivo de soja en la zona núcleo de producción argentina, estableciendo los elementos que se encuentran en condiciones deficientes.

CAPITULO III

III. - Materiales y Métodos

Para la toma de muestras foliares de soja se utilizó la metodología planteada por EMBRAPA, en lotes seleccionados de la región núcleo donde los productores realizaban buenas prácticas de cultivo y en donde las variaciones de rendimiento fueron causadas por el ambiente, además de un par de sitios en las provincias de Chaco y Entre Ríos.

Se describen los métodos de análisis químicos y de establecimiento de las normas, y además cálculos de índices de nutrientes para la aplicación del método DRIS para la determinación del balance nutricional y para el establecimiento de la línea de máximos rendimientos.

III.1. Toma de muestras

Durante los ciclos agrícolas 2007-2008, 2008-2009, 2009-2010 y 2011-2012 se tomaron muestras foliares de soja en las diferentes zonas sojeras del país tratando de abarcar la mayor variabilidad posible.

Para la toma de muestras se utilizó la metodología planteada por la Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), colectando la tercera hoja desarrollada contando desde el extremo superior de la planta a partir del estadio de inicio a plena floración, R1 a R2 (escala de Fher and Caviness, 1977) sobre el tallo principal (Figura 17). R1 en esta escala es cuando se observa una flor en cualquier parte de la planta y R2 cuando se ha completado la floración.

Se recogieron alrededor de 35 hojas (con sus tres folíolos) recién maduras, sin pecíolo, que, en general, fueron la tercera o cuarta hoja debajo del ápice del tallo principal, considerando que una hoja está desarrollada cuando el borde de sus folíolos no se tocan entre sí.

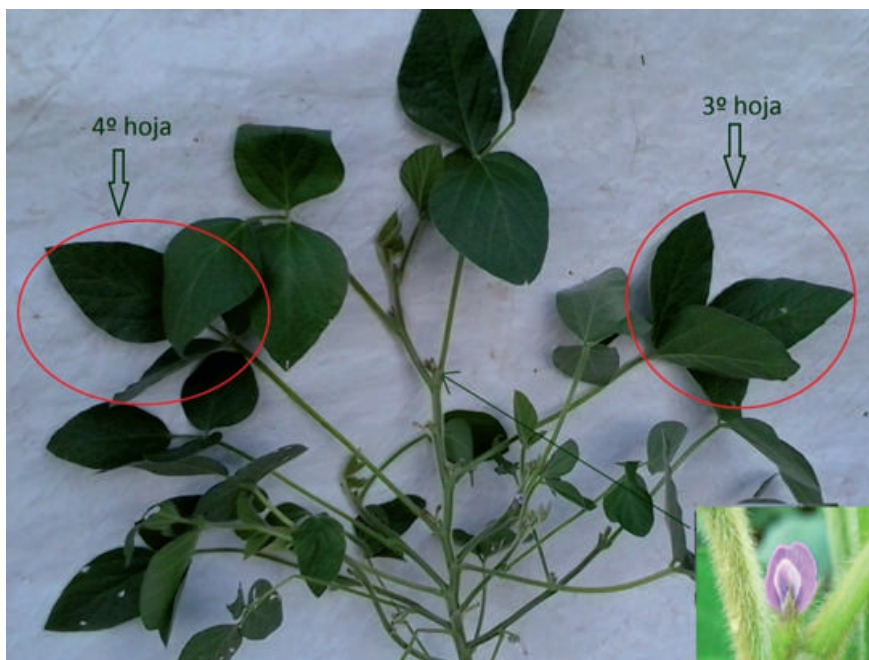


Figura 17. Metodología de muestreo foliar (Foto Propia).

Para la toma de las muestras de hoja se tomaron en cuenta los siguientes puntos:

- El muestreo se realizó al azar, en áreas representativas dentro del sitio de muestreo.

- Al recoger las hojas, se pusieron en bolsas de papel limpias, desarrolladas para este fin. Se tuvo en cuenta no utilizar bolsas con contaminantes tales como residuos vegetales, suelo u otros productos, que podrían interferir en el análisis. Se registró la información de la parcela en la bolsa de papel.

- No se recogieron las hojas dañadas por insectos, o las hojas con manchas anormales, a menos que la posible causa de esta anomalía fueran de origen nutricional.

- Si las hojas que se recogieron tuvieron aplicación de fertilizantes o plaguicidas, se registró la fecha de aplicación, tipo de producto y la dosis, y cualquier otra información que se consideró necesaria. Estas observaciones permiten evitar errores en la interpretación y mejorar la comprensión de los resultados.

- Se enviaron las hojas tan pronto como fue posible a un laboratorio de confianza para su procesamiento, en este caso el Laboratorio de Tecnologías Aplicadas de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Entre Ríos, Argentina. Cuando no se hizo de forma inmediata, se secaron las hojas a la sombra y, luego, se enviaron al laboratorio.

III.2. Sitios de muestreo

Las investigaciones realizadas en el sector agrícola, generalmente son llevadas adelante en estaciones experimentales o en pequeñas parcelas donde se evalúa el efecto de alguna variable en particular. Para poder representar el estatus nutricional del cultivo fueron elegidos lotes de producción de las diferentes zonas sojeras del país, que abarcaron el centro sur de Santa Fé, Sudeste de Córdoba y Norte de Buenos Aires. Los sitios muestreados fueron lotes donde los productores realizaban buenas prácticas de cultivo y la variación de rendimiento era causada principalmente por el ambiente.

Además, se seleccionó un sitio en la provincia de Entre Ríos y otro en la provincia de Chaco, correspondientes a zonas consideradas marginales. Estos lotes fueron de bajo rendimiento por lo que no se tuvieron en cuenta en el cálculo de las normas.

En la figura 18 se observa la distribución de las localidades por provincia donde se situaron los sitios de muestreo.

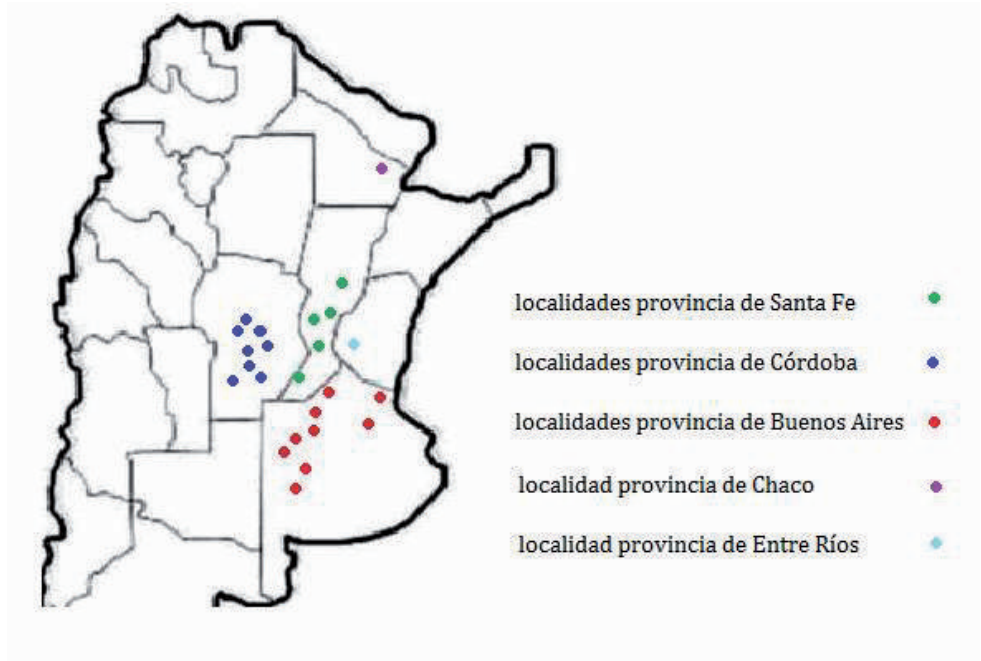


Figura 18. Ubicación de las localidades donde se seleccionaron los sitios para seguimiento y muestreo del cultivo (campañas 2007/2008, 2008/2009, 2009/2010 y 2011/2012).

En la tabla 3 se presenta detallado por provincia, las localidades y el número de sitios de muestreo por localidad.

Tabla 3. Provincias, localidades y número de sitios por localidad, seleccionados para realizar el muestreo.

| Provincia | Localidad | Nº de sitios |
|------------------|----------------------|---------------------|
| Santa Fe | Maria Juana | 13 |
| | San Justo | 13 |
| | Humbold | 8 |
| | Las Bandurrias | 1 |
| | Maggiolo | 1 |
| Córdoba | Colonia Progreso | 2 |
| | Corral de Bustos | 8 |
| | Villa María | 8 |
| | Canals | 1 |
| | Manfredi | 1 |
| | Monte Rosario | 1 |
| | Río Cuarto | 1 |
| | Santa Eufemia | 1 |
| Buenos Aires | Alberti | 3 |
| | 9 de Julio | 27 |
| | Daireaux | 5 |
| | Colón | 1 |
| | Girodias | 1 |
| | Girondo | 1 |
| | General Lamadrid | 1 |
| | San Antonio de Areco | 1 |
| Entre Ríos | Victoria | 1 |
| Chaco | Colonia Elisa | 1 |
| Total | | 101 |

De las 101 muestras obtenidas, en 76 se pudo obtener el rendimiento del lote.

III.3. Preparación de muestras foliares

Una vez recibidas las muestras en el laboratorio, fueron secadas en una estufa de aire forzado a una temperatura de 60° C por 48 horas, para luego ser molidas en un molino de acero inoxidable hasta un tamaño de aproximadamente 1 mm.

III.4. Análisis Químicos

Para evaluar la concentración de nutrientes, se pesó un gramo de material vegetal seco y molido, que fue digerido con mezcla nitroperclórica (1 L de ácido nítrico concentrado al 70% con 500 ml de ácido perclórico concentrado al 70%).

El P fue cuantificado colorimétricamente por el método de Murphi-Riley (1962). El K, se determinó por fotometría de llama; el Ca y el Mg y los micronutrientes, Fe, Cu, Zn y Mn fueron determinados por espectrofotometría de absorción atómica, mientras que para el B se utilizó el método de la azometina por colorimetría.

El nitrógeno total fue determinado luego de una digestión, por el método Kjeldahl sobre 0,3 gramos de muestra. La concentración de NH_4^+ en el extracto se determinó por destilación por arrastre de vapor, recogiendo en ácido bórico 2% junto con una mezcla indicadora de rojo de metilo y verde de bromocresol, titulando con ácido sulfúrico 0,005 N (Bartels, 1996).

III.5. Determinación de la Productividad

La productividad fue determinada en el momento de la cosecha del cultivo, donde se tuvo en cuenta la producción total del lote seleccionado. Los registros de los rendimientos fueron efectuados por los productores, con la presencia de un técnico.

III.6. Aplicación del método DRIS

III.6.1. Determinación de las Normas

Las normas se establecieron utilizando las concentraciones de nutrientes de la población de alta productividad. El criterio para la separación de poblaciones de baja y alta productividad, fue similar a la adoptada por Urano et al. (2006) en una tesis doctoral sobre aplicación de DRIS para diagnosticar el estado nutricional del cultivo de soja en dos regiones de Brasil.

El criterio utilizado, fue determinar una productividad mínima, para dividir los lotes en dos poblaciones, una de alta y otra de baja. Para esta división, se tomó aquellos lotes cuyo rendimiento fue superior a la media de la población, más un 0,5 de desvío estándar. Para este caso, la productividad fue \geq a 3978 kg ha⁻¹.

Una vez definida la población de alta productividad, se procedió a calcular las normas, constituidas por las relaciones entre todos los nutrientes, determinando además, sus respectivos desvíos estándar, coeficiente de variación y el cociente de varianzas entre la varianza de la población de bajo rendimiento y la varianza de la población de altos rendimientos.

III.6.2. Cálculo de Índices de Nutrientes N-DRIS

Una vez definidas las normas, la interpretación de la concentración de los nutrientes de una muestra, por medio del método DRIS, se realiza para cada elemento mediante el cálculo de los índices DRIS por nutriente.

Los índices de interpretación DRIS son calculados en dos etapas: a) en la primera fase, se calculan las funciones de comparación de los cocientes de cada par de nutrientes, y b) en la segunda, la sumatoria de las funciones de comparación que incluye cada nutriente.

Existen en la literatura, procedimientos básicos para el cálculo de las funciones de comparación DRIS, dos de las cuales son las fórmulas propuestas originalmente por Beaufils (1973) y Jones (1981).

III.6.2.1. Según Beaufils

Beaufils (1973) utilizó relaciones porcentuales para establecer las funciones de los nutrientes e impuso restricciones cuando la relación de la muestra (A/B) era mayor o menor que la norma (a/b), por lo que propuso el uso de una fórmula para cada condición (1 o 2). El autor además, utilizó el coeficiente de variación (CV), como estimador de la dispersión de las relaciones de la población de referencia para el cálculo de las funciones N-DRIS.

a- La función A/B se utiliza en el cálculo de índices de ambos nutrientes: A y B. Esta función se calcula de dos maneras, dependiendo de si la relación A/B de la muestra es mayor (1) o menor (2) que la norma (a/b). Cuando se utiliza para calcular el índice de A, la función A/B se incluye antes de otras funciones {índice A=[f(A/B) + f (A/C) ...]/ z}. Sin embargo, la misma función (A/B) se usa para obtener el índice B, pero como B es el denominador de la función, se considera como un valor negativo en el cálculo de este índice {índice B = [f- (A/B) + f (B/C)...]/ z} (Walworth y Sumner, 1987).

Entonces:

Cuando $A/B < a/b$

$$f \left(\frac{A}{B} \right) = \left(1 - \frac{a/b}{A/B} \right) \frac{1000}{CV} \quad (1)$$

Cuando $A/B > a/b$

$$f \left(\frac{A}{B} \right) = \left(\frac{A/B}{a/b} - 1 \right) \frac{1000}{CV} \quad (2)$$

Donde:

$f \left(\frac{A}{B} \right)$: Función de la relación A/B

$\frac{a}{b}$: Valor norma DRIS

$\frac{A}{B}$: Valor de la relación A/B en la muestra.

CV: Coeficiente de variación de la población de donde se obtuvo la norma DRIS

b- Una vez estimada la función de cada relación, se calcularon los índices de los nutrientes involucrados, seleccionando sólo una de las dos relaciones que involucra un nutriente (A/B o B/A).

Para determinar qué relación de nutrientes (A/B o B/A, por ejemplo), sería utilizada en las ecuaciones de cálculo de los índices, se observaron las relaciones de varianzas entre las poblaciones de baja y de alta producción. Se adoptaron las relaciones que presentaron valores más altos.

Las ecuaciones (3 a 13) fueron las utilizadas para el cálculo de los índices DRIS.

$$I(N) = -\llbracket f(P\{N\}) + f(N\{K\}) - f(Ca\{N\}) - f(Mg\{N\}) + f(N\{S\}) - f(Cu\{N\}) - f(Zn\{N\}) - f(Mg\{N\}) - f(Fe\{N\}) - f(B\{N\}) \rrbracket_{10} \quad (3)$$

$$I(P) = \llbracket f(P\{N\}) + f(P\{K\}) + f(P\{S\}) + f(P\{Zn\}) - f(Ca\{P\}) - f(Mg\{P\}) - f(Cu\{P\}) - f(Mn\{P\}) - f(Fe\{P\}) - f(B\{P\}) \rrbracket_{10} \quad (4)$$

$$I(K) = \llbracket -f(N\{K\}) - f(P\{K\}) - f(Ca\{K\}) - f(Mg\{K\}) + f(K\{S\}) - f(Cu\{K\}) - f(Zn\{K\}) - f(Mn\{K\}) - f(Fe\{K\}) - f(B\{K\}) \rrbracket_{10} \quad (5)$$

$$I(Mg) = \llbracket f(Mg|N) + f(Mg|P) - f(Ca|Mg) + f(Mg|K) + f(Mg|S) - f(Cu|Mg) \\ + f(Mg|Zn) - f(Mn|Mg) - f(Fe|Mg) - f(B|Mg) \rrbracket_{10} \quad (6)$$

$$I(S) = \llbracket -f(N|S) - f(P|S) - f(Ca|S) - f(Mg|S) - f(K|S) - f(Cu|S) - f(Zn|S) \\ - f(Mn|S) - f(Fe|S) - f(B|S) \rrbracket_{10} \quad (7)$$

$$I(Ca) = \llbracket f(Ca|N) + f(Ca|P) + f(Ca|K) + f(Ca|Mg) + f(Ca|S) - f(Cu|Ca) + f(Ca|Fe) \\ - f(Mn|Ca) - f(Fe|Ca) - f(B|Ca) \rrbracket_{10} \quad (8)$$

$$I(Zn) = \llbracket f(Zn|N) - f(P|Zn) + f(Zn|K) - f(Ca|Zn) + f(Zn|Mg) - f(Cu|Zn) - f(S|Zn) \\ - f(Mn|Zn) - f(Fe|Zn) - f(B|Zn) \rrbracket_{10} \quad (9)$$

$$I(Mn) = \llbracket f(Mn|N) + f(Mn|P) + f(Mn|K) + f(Mn|Mg) + f(Mn|S) + f(Mn|Cu) \\ + f(Mn|Zn) + f(Mn|Ca) + f(Mn|Fe) - f(B|Mn) \rrbracket_{10} \quad (10)$$

$$I(Fe) = \llbracket f(Fe|N) + f(Fe|P) - f(Ca|Fe) + f(Fe|Mg) + f(Fe|S) - f(Cu|Fe) \\ + f(Fe|Zn) - f(Mn|Fe) + f(Fe|K) - f(B|Fe) \rrbracket_{10} \quad (11)$$

$$I(Cu) = \llbracket f(Cu|N) + f(Cu|P) + f(Cu|Ca) + f(Cu|Mg) + f(Cu|S) + f(Cu|Fe) \\ + f(Cu|Zn) - f(Mn|Cu) + f(Cu|K) + f(Cu|B) \rrbracket_{10} \quad (12)$$

$$I(B) = \llbracket f(B|N) + f(B|K) + f(B|Ca) + f(B|Mg) + f(B|P) - f(Cu|B) + f(B|Zn) + f(B|Mn) + f(B|Fe) + f(B|S) \rrbracket_{10} \quad (13)$$

III.6.2.2. Según Jones

Jones propuso una fórmula (14) para las dos condiciones (A/B menor a a/b y A/B mayor a a/b), y como estimador de la dispersión, utilizó la desviación estándar.

a- Para el cálculo de las funciones se utiliza la formula (14):

$$f\left(\frac{A}{B}\right) = \left(\frac{A/B}{a/b}\right) \left(\frac{10}{Dn}\right) \quad (14)$$

$f\left(\frac{A}{B}\right)$: Función de la relación A/B

$\frac{a}{b}$: Valor de la norma DRIS

$\frac{A}{B}$: Valor de la relación A/B en la muestra.

D_n : Desvío Estándar para la población de donde se obtuvo la norma DRIS.

b- Con la sumatoria de las funciones de los cocientes de los nutrientes calculados en el punto a, se realizó el cálculo de los índices DRIS de cada nutriente con el uso de las ecuaciones (15 a 25):

$$\begin{aligned}
I(N) = & \llbracket f(N|P) + f(N|K) + f(N|Ca) + f(N|Mg) + f(N|S) + f(N|Zn) + f(N|Mn) \\
& + f(N|Fe) + f(N|B) + f(N|Cu) - f(P|N) - f(K|N) - f(Ca|N) \\
& - f(Mg|N) - f(S|N) - f(Cu|N) - f(Zn|N) - f(Mn|N) - f(Fe|N) \\
& - f(B|N) \rrbracket_{20}
\end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned}
I(P) = & \llbracket f(P|N) + f(P|K) + f(P|Ca) + f(P|Mg) + f(P|S) + f(P|Zn) + f(P|Mn) \\
& + f(P|Fe) + f(P|B) - f(N|P) - f(K|P) - f(Ca|P) - f(Mg|P) \\
& - f(S|P) - f(Cu|P) - f(Zn|P) - f(Mn|P) - f(Fe|P) - f(B|P) \rrbracket_{20}
\end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned}
I(K) = & \llbracket f(K|N) + f(K|P) + f(K|Ca) + f(K|Mg) + f(K|S) + f(K|Cu) + f(K|Zn) \\
& + f(K|Mn) + f(K|Fe) + f(K|B) - f(N|K) - f(P|K) - f(Ca|K) \\
& - f(Mg|K) - f(S|K) - f(Cu|K) - f(Zn|K) - f(Mn|K) - f(Fe|K) \\
& - f(B|K) \rrbracket_{20}
\end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned}
I(Mg) = & \llbracket f(Mg|N) + f(Mg|P) + f(Mg|Ca) + f(Mg|K) + f(Mg|S) + f(Mg|Cu) \\
& + f(Mg|Zn) + f(Mg|Mn) + f(Mg|Fe) + f(Mg|B) - f(N|Mg) - f(P|Mg) \\
& - f(Ca|Mg) - f(K|Mg) - f(S|Mg) - f(Cu|Mg) - f(Zn|Mg) \\
& - f(Mn|Mg) - f(Fe|Mg) - f(B|Mg) \rrbracket_{20}
\end{aligned} \tag{18}$$

$$\begin{aligned}
I(S) = & \llbracket f(S|N) + f(S|P) + f(S|Ca) + f(S|K) + f(S|Mg) + f(S|Cu) + f(S|Zn) \\
& + f(S|Mn) + f(S|Fe) + f(S|B) - f(N|S) - f(P|S) - f(Ca|S) - f(K|S) \\
& - f(Mg|S) - f(Cu|S) - f(Zn|S) - f(Mn|S) - f(Fe|S) - f(B|S) \rrbracket_{20}
\end{aligned} \tag{19}$$

$$\begin{aligned}
I(Ca) = & \llbracket f(Ca|N) + f(Ca|P) + f(Ca|S) + f(Ca|K) + f(Ca|Mg) + f(Ca|Cu) \\
& + f(Ca|Zn) + f(Ca|Mn) + f(Ca|Fe) + f(Ca|B) - f(N|Ca) - f(P|Ca) \\
& - f(S|Ca) - f(K|Ca) - f(Mg|Ca) - f(Cu|Ca) - f(Zn|Ca) - f(Mn|Ca) \\
& - f(Fe|Ca) - f(B|Ca) \rrbracket_{20}
\end{aligned} \tag{20}$$

$$\begin{aligned}
I(Zn) = & \llbracket f(Zn|N) + f(Zn|P) + f(Zn|S) + f(Zn|K) + f(Zn|Mg) + f(Zn|Cu) \\
& + f(Zn|Ca) + f(Zn|Mn) + f(Zn|Fe) + f(Zn|B) - f(N|Zn) - f(P|Zn) \\
& - f(S|Zn) - f(K|Zn) - f(Mg|Zn) - f(Cu|Zn) - f(Ca|Zn) - f(Mn|Zn) \\
& - f(Fe|Zn) - f(B|Zn) \rrbracket_{20}
\end{aligned} \tag{21}$$

$$\begin{aligned}
I(Mn) = & \llbracket f(Mn|N) + f(Mn|P) + f(Mn|S) + f(Mn|K) + f(Mn|Mg) + f(Mn|Cu) \\
& + f(Mn|Ca) + f(Mn|Zn) + f(Mn|Fe) + f(Mn|B) - f(N|Mn) - f(P|Mn) \\
& - f(S|Mn) - f(K|Mn) - f(Mg|Mn) - f(Cu|Mn) - f(Ca|Mn) - f(Zn|Mn) \\
& - f(Fe|Mn) - f(B|Mn) \rrbracket_{20}
\end{aligned} \tag{22}$$

$$\begin{aligned}
I(Fe) = & \llbracket f(Fe|N) + f(Fe|P) + f(Fe|S) + f(Fe|K) + f(Fe|Mg) + f(Fe|Cu) + f(Fe|Ca) \\
& + f(Fe|Zn) + f(Fe|Mn) + f(Fe|B) - f(N|Fe) - f(P|Fe) - f(S|Fe) - f(K|Fe) \\
& - f(Mg|Fe) - f(Cu|Fe) - f(Ca|Fe) - f(Zn|Fe) - f(Mn|Fe) - f(B|Fe) \rrbracket_{20}
\end{aligned} \tag{23}$$

$$\begin{aligned}
I(Cu) = & \llbracket f(Cu|N) + f(Cu|P) + f(Cu|S) + f(Cu|K) + f(Cu|Mg) + f(Cu|Fe) + f(Cu|Ca) \\
& + f(Cu|Zn) + f(Cu|Mn) + f(Cu|B) - f(N|Cu) - f(P|Cu) - f(S|Cu) \\
& - f(K|Cu) - f(Mg|Cu) - f(Fe|Cu) - f(Ca|Cu) - f(Zn|Cu) - f(Mn|Cu) \\
& - f(B|Cu) \rrbracket_{20}
\end{aligned} \tag{24}$$

$$\begin{aligned}
I(B) = & \llbracket f(B|N) + f(B|P) + f(B|S) + f(B|K) + f(B|Ca) + f(B|Fe) + f(B|Mg) \\
& + f(B|Zn) + f(B|Mn) + f(B|Cu) - f(N|B) - f(P|B) - f(S|B) - f(K|B) \\
& - f(Mg|B) - f(Fe|B) - f(Ca|B) - f(Zn|B) - f(Mn|B) - f(Cu|B) \rrbracket_{20}
\end{aligned} \tag{25}$$

Cada índice es la media de todas las funciones de relaciones donde está involucrado el nutriente, para una muestra. Cada función intermedia es una comparación de la relación encontrada en la muestra individual, con el patrón o norma establecida para esa relación. Las funciones pueden ser directas o inversas, las directas ocurren cuando el nutriente en estudio se encuentra en el numerador de las relaciones, mientras que las inversas son cuando se encuentra en el denominador de las relaciones. Si el elemento que se calcula está en el numerador se le da el signo positivo, pero si está en el denominador se le da el signo negativo.

III.7. Orden de limitación por deficiencia

La suma de los índices positivos y negativos debe ser cero para que exista un balance entre los nutrientes de la muestra analizada. Índices negativos significan deficiencia y los índices positivos indican suficiencia o excesos relativos (desbalance nutricional). El más negativo es el más deficiente y los que le siguen indican el orden de requerimientos de los nutrientes (Walworth y Sumner, 1987).

III.8. Determinación del índice de balance nutricional (IBN)

Una vez determinados los índices DRIS para cada nutriente, se calculó el índice de balance nutricional (IBN), sumando todos los índices en valor absoluto. El valor más grande supone mayor desbalance nutricional y por lo tanto se esperaría un menor rendimiento (Davee et al., 1986). Un valor de IBN más cercano a cero, indicará un mayor balance nutricional en el cultivo.

La ecuación (26) representa el cálculo general para determinar el IBN:

$$\text{IBN} = |\text{Índice A}| + |\text{Índice B}| + \dots + |\text{Índice N}| \quad (26)$$

Dónde:

$|\text{Índice A}|$ = índice del nutriente A

$|\text{Índice B}|$ = índice del nutriente B

$|\text{Índice N}|$ = índice del nutriente N

III.9. Establecimiento de la línea de máximos (Boundary Line Developmen System, BOLIDES)

Existe una metodología estadística para establecer límites críticos para análisis de suelo o de plantas mediante el desarrollo de líneas de límite máximo (Schung et al., 1996). Básicamente los valores observados de nutrientes en suelo o en planta, y el rendimiento absoluto o relativo alcanzado son graficados en un espacio bidimensional. La línea que describe los rendimientos más altos observados en el rango de valores de nutrientes medidos es conocida como la línea de límite máximo o de frontera y toma la forma del filo o borde superior del cuerpo de datos disponibles. Esta línea describe la respuesta a variaciones en el parámetro analizado cuando los otros factores están lo más cerca posible de un óptimo o condición no limitante.

El algoritmo para su cálculo es el siguiente:

Analizar el set de datos original (S_1) y eliminar los valores fuera de rango o anormales para evitar distorsiones que invaliden los resultados.

Para esto pueden utilizarse distintos criterios o métodos.

Si es oportuno, los datos se pueden clasificar por una tercera variable que influya sobre la relación analizada y analizarlos separadamente.

Los pares de datos se ordenan de manera creciente del valor de X. Se identifica el valor más alto de Y (Y_{max}).

Antes de ajustar la línea de máximo se genera un nuevo set de pares de datos de igual número de datos (S_2). Para esto se utiliza el siguiente criterio:

$$\begin{aligned}
 X_i^{(2)} &= X_i^{(1)} && \text{para } i= 1, 2, \dots N. \\
 Y_1^{(2)} &= Y_2^{(1)} \\
 Y_i^{(2)} &= \begin{cases} Y_{i+1}^{(1)} & \text{si } Y_{i+1}^{(1)} < Y_i^{(2)} \\ Y_{i+1}^{(1)} & \text{si } Y_{i+1}^{(1)} \geq Y_i^{(2)} \end{cases} && \text{y: } 1 \leq i \leq i_{(max)}-1
 \end{aligned} \tag{27}$$

$$Y_{i-1}^{(2)} = \begin{cases} Y_i^{(2)} & \text{si } Y_{i-1}^{(1)} < Y_i^{(2)} \\ Y_{i-1}^{(1)} & \text{si } Y_{i-1}^{(1)} \geq Y_i^{(2)} \end{cases} \quad \text{y: } i_{(\max)+2} \leq i \leq N_1 \quad (28)$$

El primer y último dato, el punto de máximo rendimiento y el número de pares de datos son iguales en los dos set de datos S_1 y S_2 . Dado que S_1 está ordenado de manera creciente S_2 también lo está. El sentido de esta transformación es que cada par de datos sea fijado con respecto a su vecino. Los valores de $Y_i^{(2)}$ son crecientes hasta llegar a $Y_{(\max)}$ y decrecientes luego.

La función de límite máximo ($f(x)$) es ajustada a los datos de S_2 .

$$f(x) := \begin{cases} 0 & \text{para } X < X_i^{(2)} \\ Y_i^{(2)} & \text{para } X_i^{(2)} \leq X < X_{i+1}^{(2)} \\ Y_{(\max)}^{(2)} & \text{para } X = X_{(\max)}^{(2)} \\ Y_{i-1}^{(2)} & \text{para } X_i^{(2)} < X \leq X_{i+1}^{(2)} \\ 0 & \text{para } X > X_{N_2}^{(2)} \end{cases} \quad \text{y: } 1 \leq i \leq i_{(\max)-1} \quad \text{y: } i_{(\max)} \leq i \leq N_2 \quad (29)$$

En muchos casos es preferible disponer de una expresión funcional de esta relación, donde la misma es función únicamente de X y no depende del número de datos. La segunda derivada respecto a X debe existir y ser continua.

Lo más conveniente es recurrir a un polinomio de cuarto grado. Aunque puede ser de menor grado. Luego es posible estimar el óptimo o el máximo, o definir un rango óptimo para el nutriente o variable X . Esta metodología permite la identificación del rango óptimo de nutrientes en hojas o en suelo con un criterio estadístico (Schung et al., 1996).

CAPITULO IV

IV.- Resultados y discusión

Se presenta la concentración de nutrientes foliares en la región núcleo de Argentina (analizando en profundidad para cada provincia) para los años de estudio, interpretado y desarrollado por rangos de concentración foliar.

Se presenta la norma DRIS generada y los índices para el cultivo de soja en Argentina, donde se discute con otras normas establecidas para países productores.

A partir de la información obtenida, se desarrolla el orden de limitación de nutrientes por deficiencia, el índice de balance nutricional y el estatus nutricional del cultivo de soja, caracterizando este último por provincia.

IV.1. Clima de los años de evaluación y rendimiento del cultivo

Climáticamente, las campañas agrícolas 2007/08, 2008/09 y 2011/12 se vieron afectadas por la escasez de lluvias durante el ciclo del cultivo de la soja; por el contrario, en la campaña 2009/10 la siembra del cultivo en general se atrasó por excesos de precipitaciones, pero debido a las posteriores lluvias durante el desarrollo del cultivo, los rendimientos promedios fueron buenos en el país.

La fertilización de los lotes estuvo de acuerdo a los métodos de diagnóstico actuales con la realización de análisis de suelo y recomendación de fósforo y azufre según los resultados obtenidos por nivel crítico.

En todos los lotes las semillas fueron inoculadas con bacterias del género *Rizhobium* para lograr una buena nodulación, que asegure el aporte de nitrógeno.

Los controles de malezas, insectos y enfermedades fueron realizados de acuerdo a los programas habituales de manejo.

Los rendimientos del cultivo de soja para los sitios y campañas analizadas variaron entre 1032 y 5349 kg ha⁻¹, con un promedio de 3441 kg ha⁻¹. Buenos Aires fue la provincia que presentó el promedio más alto con 4166 kg ha⁻¹, seguida por Córdoba con 3128 kg ha⁻¹ y con el menor rinde promedio la provincia de Santa Fe con 2809 kg ha⁻¹, siendo la media nacional de 2770 kg ha⁻¹. En promedio los lotes seleccionados estuvieron por encima de la media nacional.

IV.2. Concentración de Nutrientes Foliare

Las concentraciones de nitrógeno, magnesio, potasio y zinc siguieron una distribución muy próxima a la normal. En cambio, para fósforo, calcio, azufre, manganeso, hierro, cobre y boro, la concentración mostró una distribución asimétrica positiva, lo que manifestó que la mayoría de las muestras contenían bajas concentraciones de estos nutrientes (figuras 19, macronutrientes y 20, micronutrientes). Esta distribución quedó verificada en los mayores valores de asimetría que presentaron cada uno de los nutrientes mencionados anteriormente (Tabla 4).

Los micronutrientes mostraron los mayores valores de desvío estándar y varianza. Similares resultados fueron encontrados para la región Mato Grosso, Brasil, por Hoogerheide (2005) y Beverly et al. (2008), para el sureste y oeste de EE.UU.

Tabla 4. Estadística descriptiva de los nutrientes y el rendimiento en soja para el total de muestras analizadas.

| Variable | n | Media | D.E. | Var(n-1) | Mín. | Máx. | Mediana | Asimetría | Kurtosis |
|----------------------------|-----|---------|--------|------------|--------|--------|---------|-----------|----------|
| Nt (%) | 101 | 3,58 | 0,97 | 0,94 | 1,29 | 5,42 | 3,66 | -0,08 | -0,47 |
| P (%) | 101 | 0,3 | 0,12 | 0,02 | 0,13 | 0,8 | 0,27 | 1,46 | 2,44 |
| K (%) | 101 | 2,31 | 0,74 | 0,54 | 0,9 | 3,6 | 2,48 | -0,25 | -0,89 |
| Ca (%) | 101 | 1,36 | 0,33 | 0,11 | 0,85 | 2,18 | 1,31 | 0,49 | -0,68 |
| Mg (%) | 101 | 0,35 | 0,1 | 0,01 | 0,17 | 0,55 | 0,36 | 0,04 | -0,94 |
| S (%) | 87 | 0,27 | 0,17 | 0,03 | 0,06 | 0,84 | 0,23 | 1,54 | 2,53 |
| Zn (mg Kg ⁻¹) | 101 | 48,53 | 14,02 | 196,46 | 23 | 87 | 49 | 0,36 | -0,09 |
| Mn (mg Kg ⁻¹) | 101 | 127,34 | 58,59 | 3432,53 | 59,75 | 301 | 105 | 1,13 | 0,16 |
| Fe (mg Kg ⁻¹) | 101 | 176,69 | 79,4 | 6303,75 | 70 | 457 | 150,6 | 1,15 | 1,24 |
| Cu (mg Kg ⁻¹) | 101 | 15,68 | 12,18 | 148,41 | 4 | 68 | 10 | 1,91 | 3,98 |
| B (mg Kg ⁻¹) | 91 | 54,41 | 20,94 | 438,6 | 26,5 | 168,78 | 49,2 | 2,16 | 8,85 |
| RINDE(KgHa ⁻¹) | 76 | 3441,91 | 1072,2 | 1149610,72 | 1032,5 | 5349 | 3494 | -0,17 | -1,26 |

D.E.: Desvío estándar; Var.: Varianza; Min.: Mínimo; Máx.: Máximo.

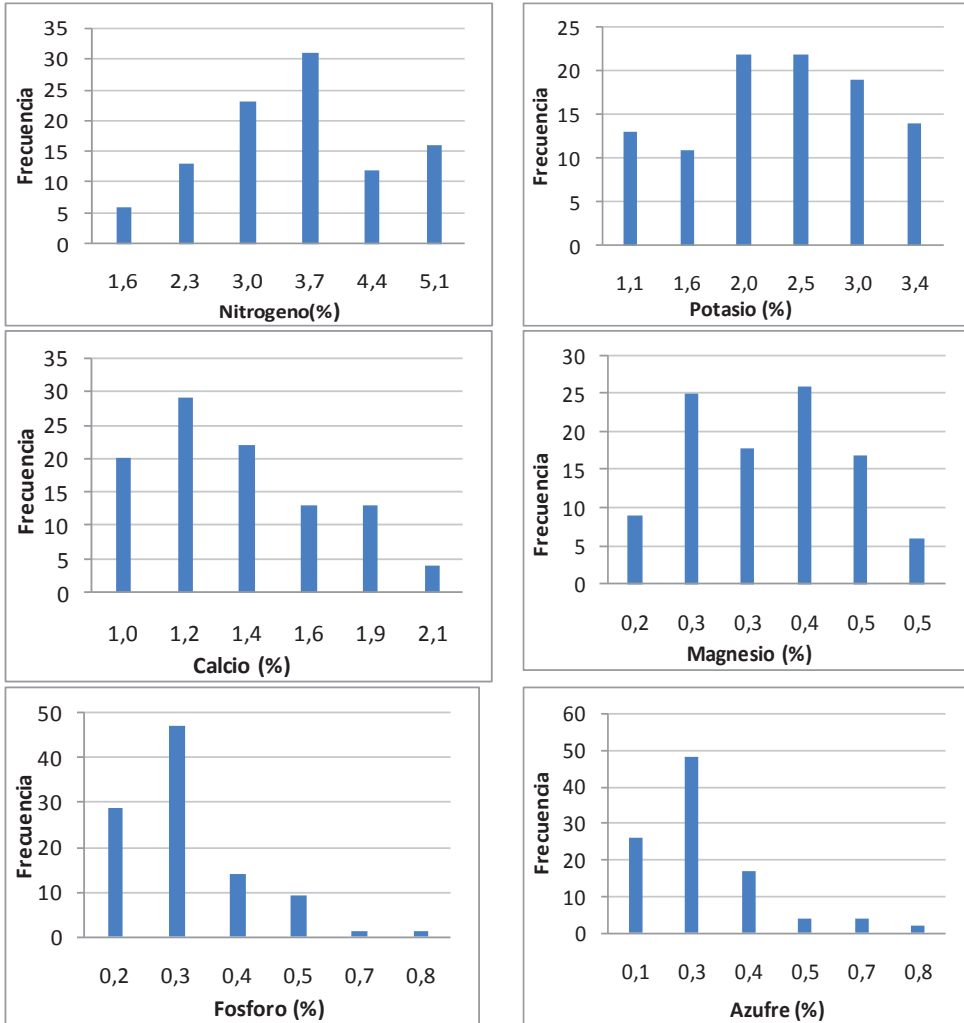


Figura 19. Distribución de frecuencias de concentración de macronutrientes en hojas de soja (101 muestras).

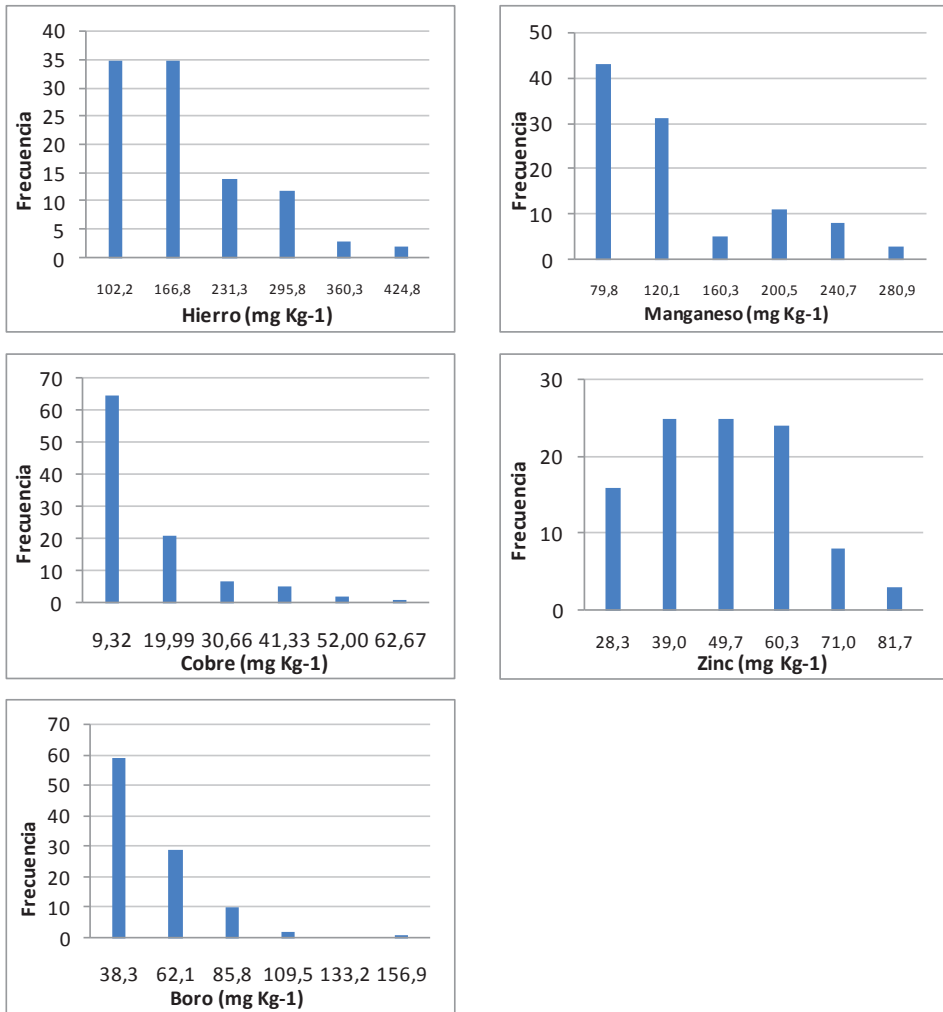


Figura 20. Distribución de frecuencias de concentración de micronutrientes en hojas de soja (101 muestras).

IV.2.1. Interpretación por rangos de concentración foliar con tablas de referencia

Para tener una referencia del estado nutricional del cultivo, se compararon los valores observados en nuestra base de datos con las tablas de suficiencia publicadas por EMBRAPA (2004), en la cual están clasificados los valores de concentraciones en deficientes, bajos, suficientes o medios, altos y excesivos o muy altos (Tabla 5). En la tabla 6, se relacionaron los valores de concentración obtenidos para este trabajo y se registró la frecuencia observada en los diferentes rangos de interpretación de la tabla de EMBRAPA.

Tabla 5. Tablas de interpretación de macro y micronutrientes en hojas de soja (Adaptado de EMBRAPA 2004).

| Elemento | Deficiente o Muy bajo | Bajo | Suficiente o Medio | Alto | Excesivo o Muy alto |
|----------|-----------------------|-------------|---------------------|-------------|---------------------|
| | | | % | | |
| N | <3,25 | 3,25 - 4,5 | 4,51 - 5,5 | 5,51 - 7 | >7 |
| P | <0,16 | 0,16 - 0,25 | 0,26 - 0,5 | 0,51 - 0,8 | >0,8 |
| K | <1,25 | 1,25 - 1,70 | 1,71 - 2,5 | 2,51 - 2,75 | >2,75 |
| Ca | <0,2 | 0,2 - 0,35 | 0,36 - 2 | 2,01 - 3 | >3 |
| Mg | <0,1 | 0,1 - 0,25 | 0,26 - 1 | 1,01 - 1,50 | >1,5 |
| S | <0,15 | 0,15 - 2 | 0,21 - 0,4 | >0,4 | - |
| | | | mg kg ⁻¹ | | |
| Mn | <15 | 15 - 20 | 21 - 100 | 101 - 250 | >250 |
| Fe | <30 | 30 - 50 | 51 - 350 | 351 - 500 | >500 |
| B | <10 | 10 - 20 | 21 - 55 | 56 - 80 | >80 |
| Cu | - | <6 | 6 - 14 | >14 | - |
| Zn | <11 | 11 - 20 | 21 - 50 | 51 - 75 | >75 |

En la tabla 6, se observa que el nitrógeno, fue el elemento que presentó la mayor cantidad de lotes dentro de los rangos muy bajo y bajo. Para fósforo, un 48% de lotes estuvieron en valores suficiente o medios y un 42% en valores bajos y muy bajos. Potasio con lotes en todo el rango de interpretación, desde

valores bajos a excesivos. Para calcio y hierro el comportamiento de los lotes fue muy homogéneo, un 98% y un 96%, respectivamente, de las muestras se ubicaron en el rango suficiente o medio. Para magnesio, el 83% de los lotes estuvieron dentro del rango medio, y el resto en valores bajos. El azufre con el 35% de las muestras en rangos muy bajo y bajo, y el 51% en el rango medio y un 14% en el rango alto. Zinc, manganeso y boro tuvieron un comportamiento similar en este análisis, ya que la mayor parte de los lotes se ubicaron dentro de los rangos medios a alto y un porcentaje muy bajo de los lotes presentaron un valor muy alto de concentración para estos nutrientes. Para cobre, un 62% de los lotes mostraron valores suficientes o medio, un 35% valores altos y el resto minoritario mostró valores bajos.

Este análisis muestra que, interpretando nuestros datos con la tabla de EMBRAPA, la soja de la zona núcleo argentina tiene el siguiente orden de deficiencia: N>S>P>K>Mg, no evidenciado deficiencias el resto de los nutrientes.

Tabla 6. Número de muestras observadas para los diferentes rangos.

| Nutriente | Deficiente o Muy Bajo | Bajo | Suficiente o Medio | Alto | Excesivo o Muy Alto |
|-----------|-----------------------|------|--------------------|------|---------------------|
| N | 34 | 48 | 19 | 0 | 0 |
| P | 8 | 34 | 48 | 11 | 0 |
| K | 12 | 9 | 32 | 15 | 33 |
| Ca | 0 | 0 | 99 | 2 | 0 |
| Mg | 0 | 18 | 83 | 0 | 0 |
| S | 16 | 20 | 51 | 14 | 0 |
| Zn | 0 | 0 | 57 | 40 | 4 |
| Mn | 0 | 0 | 45 | 52 | 4 |
| Fe | 0 | 0 | 97 | 4 | 0 |
| Cu | 0 | 2 | 63 | 36 | 0 |
| B | 0 | 0 | 67 | 24 | 10 |

IV.2.2. Desarrollo de Rangos de Interpretación de nutrientes Foliares

Para la interpretación de los resultados de análisis de tejidos vegetales existe el criterio de suficiencia, el cual pretende que los valores foliares no sean inferiores a un nivel crítico o se sitúen dentro de un rango de suficiencia.

A partir de la concentración foliar de nutrientes obtenidos en Argentina, se realizó un ajuste por los máximos, determinando las diferentes clases arbitrarias de interpretación de todos los nutrientes para verificar los valores de interpretación que, en general, presentan variaciones importantes según regiones. Para esto se tomó como criterio el nivel de rendimiento, estableciéndose como concentración óptima rindes iguales o mayores a 4000 kg ha⁻¹, baja entre 3000 y 4000 kg ha⁻¹, menores a 3000 kg ha⁻¹ se tomó como muy baja, y muy alta aquella cuyos valores superan a la concentración óptima, pero el rendimiento cae por debajo de los 4000 kg ha⁻¹, por provocar toxicidad (Tabla 7). A modo de ejemplo se presenta la figura para 21, donde se observa la determinación de los rangos de concentración para nitrógeno. En ella se interpretan los siguientes rangos de concentración: óptima entre 3,1% y 5,1%; baja entre 2,3% y 3,1%; muy baja menor a 2,3 % y muy alta mayor a 5,1 %.

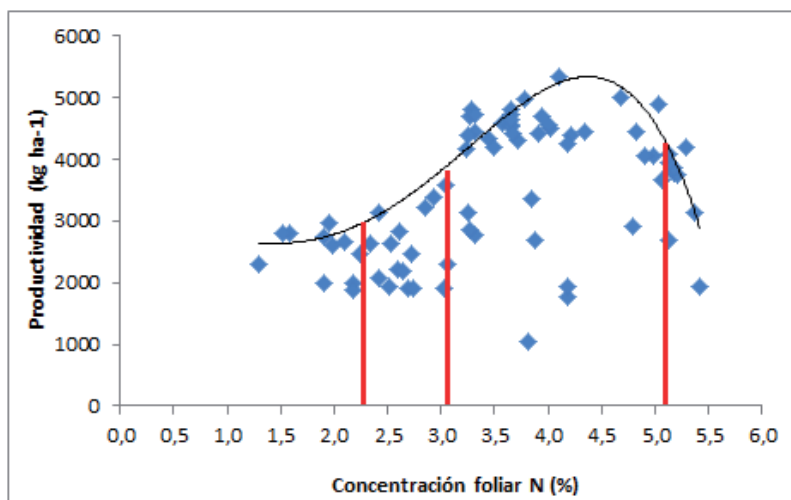


Figura 21. Ajuste gráfico de determinación de rangos de concentración foliar de nitrógeno.

De la interpretación de los rangos de concentración propuestos en función del rendimiento del cultivo surge que el orden de deficiencia nutricional del cultivo de soja es: N>K>S>Mg>P>Zn. Se interpreta además que el Mn se encuentra en algunos casos en valores excesivos. Si comparamos este orden de deficiencia con el que surge de la tabla de EMBRAPA, ambos ubican al nitrógeno en el primer lugar, mostrando como limitantes también a potasio, azufre, magnesio y fósforo pero alterando el orden de los mismos. En esta última interpretación aparece, además, el zinc como elemento deficiente para la producción.

Tabla 7. Rangos de concentraciones para micro y macronutrientes.

| Nutriente | Concentración | | | |
|-----------|---------------------|-------------|-------------|----------|
| | Muy baja | Baja | Optima | Muy alta |
| | % | | | |
| N | <2,3 | 2,3 - 3,1 | 3,1 -5,1 | >5,1 |
| P | <0,15 | 0,15 - 0,18 | 0,18- 0,76 | >0,76 |
| K | <1,1 | 1,1 - 1,8 | > 1,8 | SD |
| Mg | <0,19 | 0,19 - 0,27 | 0,27 - 0,5 | >0,5 |
| S | <0,09 | 0,09 - 0,15 | 0,15 - 0,55 | >0,55 |
| Ca | SD | <0,9 | 0,9 - 1,65 | >1,65 |
| | mg kg ⁻¹ | | | |
| Zn | SD | 23 - 33 | 33-90 | SD |
| Mn | SD | SD | 55 - 155 | >155 |
| Fe | SD | SD | 65 - 460 | SD |
| Cu | SD | <6 | 6,0 - 34 | >34 |
| B | SD | SD | 25 - 80 | >80 |

SD: Sin datos para la población analizada.

La Tabla 8 muestra niveles críticos de nutrientes en hojas de soja en floración reportados por diferentes autores. La información de EMBRAPA (1998) es orientativa para zonas de producción de soja de Brasil. Los datos de Martins (citado por Yamada, 1999) corresponden a la media de lotes de la zona de los Cerrados de Brasil con producción promedio superior a 3600 kg ha⁻¹. Los datos de Flannery (1989) corresponden a parcelas de alto rendimiento (7963 kg ha⁻¹) en EE.UU. Se incluye además, los valores observados para la región pampeana para un rendimiento promedio de 3900 kg ha⁻¹ (Melgar et al., 2003) y los valores registrados en la serie de datos de este trabajo, para la zona núcleo de Argentina, para un rendimiento mayor a 3978 kg ha⁻¹.

En esta tabla se observa, que los valores establecidos en el rango de suficiencia, para este trabajo, fueron acordes a los citados por los autores mencionados anteriormente, sin embargo se encontraron algunas diferencias.

Tabla 8. Concentraciones suficientes de nutrientes en hojas de soja según distintos autores (adaptado de Melgar et al., 2011).

| Elemento | Embrapa (1998) | Martins (1999) | Flannery (1989) | Melgar et al (2003) | Argentina- zona nucleo(2014) |
|----------|----------------|----------------|---------------------|---------------------|------------------------------|
| | | | % | | |
| N | 4,5-5,5 | 4,64±3,7 | 5,33 | 5,55±1,4 | 3,1 -5,1 |
| P | 0,26-0,5 | 0,25±0,3 | 0,36 | 0,5±0,1 | 0,18- 0,76 |
| K | 1,71-2,5 | 1,87±2,4 | 2,19 | 2,7±0,5 | > 1,8 |
| Ca | 0,36-2 | 0,79±1,7 | 1,02 | 0,34±0,1 | 0,9 - 1,65 |
| Mg | 0,26-1 | 0,33±0,6 | 0,33 | 0,33±0,1 | 0,27 - 0,5 |
| S | 0,21-0,4 | 0,25±0,3 | 0,24 | 0,9±0,2 | 0,15 - 0,55 |
| | | | mg kg ⁻¹ | | |
| Mn | 21-100 | 35±12 | 30 | 82±20 | 33-90 |
| Fe | 51-350 | 100±34 | 144 | 11±3 | 55 - 155 |
| B | 21-55 | 51±10 | 46 | 37±8 | 65 - 460 |
| Cu | 6,0-14 | 8±1,8 | 12 | 143±35 | 6,0 - 34 |
| Zn | 21-50 | 45±10 | 48 | 48±18 | 25 - 80 |

Para nitrógeno y azufre, los valores para la zona núcleo argentina fueron algo más bajos que los propuestos por los demás autores. Para Estados Unidos y la región pampeana argentina los valores fueron más exigentes en fósforo y potasio que para las demás regiones. Para calcio, los valores en la zona núcleo fueron más elevados que los reportados para las demás regiones. Para los micronutrientes, todos los trabajos presentan rangos mucho más amplios en comparación con los macronutrientes. El rango establecido en esta tesis para micronutrientes se asemejó al de EMBRAPA, encontrándose el resto de valores de referencia incluidos en dicho rango.

Es decir, que los tenores críticos de nutrientes en hoja varían de acuerdo a la zona de producción y nivel de rendimiento objetivo, por lo tanto, es necesario desarrollar bases de datos que establezcan estos valores para distintas situaciones regionales y condiciones de producción.

IV.2.3. Concentración foliar de los nutrientes por provincia

La concentración media de nutrientes en hojas de soja fue variable en función de las provincias analizadas (Tabla 9). Se observó que la concentración foliar de nitrógeno difirió significativamente ($p < 0,05$) entre las provincias de Santa Fe y Córdoba, presentándose en ésta última la mayor concentración. Para las concentraciones de potasio, magnesio y azufre no se observaron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las provincias de Buenos Aires y Córdoba, pero sí difirieron con respecto a la provincia de Santa Fe, que presentó menores valores para estos nutrientes. Para calcio y manganeso, no se observaron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las provincias de Buenos Aires y Córdoba, habiendo diferencia significativa ($p < 0,05$) entre éstas últimas y la provincia de Santa Fe que presentó mayores valores. Para zinc y cobre se observaron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las tres provincias, en el caso de zinc, Santa Fe tuvo el menor valor con una concentración foliar de $39,38 \text{ mg kg}^{-1}$ y Buenos Aires el mayor valor con $56,25 \text{ mg kg}^{-1}$. En el caso del cobre el menor valor correspondió a Santa Fe con $9,51 \text{ mg kg}^{-1}$ y el valor más alto a Córdoba con $23,45 \text{ mg kg}^{-1}$. Para las concentraciones de fósforo, hierro y boro no se observaron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las tres provincias.

Tabla 9. Concentración foliar media por nutrientes y por provincia.

| Provincia | N | P | K | Ca | Mg | S | Zn | Mn | Fe | Cu | B |
|--------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------------|----------|----------|---------|---------|
| | % | | | | | | mg kg^{-1} | | | | |
| Santa Fe | 3,20 a | 0,29 a | 1,60 a | 1,56 b | 0,29 a | 0,16 a | 39,38 a | 182,15 b | 177,58 a | 9,51 a | 57,33 a |
| Buenos Aires | 3,62 a b | 0,29 a | 2,77 b | 1,29 a | 0,39 b | 0,31 b | 56,25 c | 91,73 a | 171,75 a | 16,43 b | 52,81 a |
| Córdoba | 4,04 b | 0,32 a | 2,54 b | 1,17 a | 0,38 b | 0,36 b | 50,24 b | 105,94 a | 185,6 a | 23,45 c | 51,11 a |

Test de Medias de Fisher, $p < 0,05$.

En términos de rendimiento para estas provincias, según información de la Bolsa de Cereales de Rosario (2014), para la campaña 2013/14 el promedio nacional fue de 2770 kg ha^{-1} , donde el mayor rendimiento promedio lo obtuvieron los productores del sur de Santa Fe (3300 kg ha^{-1}) seguidos por Córdoba (2830 kg ha^{-1}) y Buenos Aires (2650 kg ha^{-1}).

Para la serie de datos de este trabajo, en Buenos Aires fue donde se obtuvo la mayor cantidad de lotes con altos rindes (Figura 22). Para esta provincia, en la tabla 9, se observó que la media para nitrógeno se encuentra en el rango de óptima concentración propuesto en la tabla 7; y que las medias de calcio, manganeso y hierro estuvieron por debajo de las medias de las demás provincias, pero estos nutrientes no estarían limitando fuertemente el rendimiento en Buenos Aires, pues los valores se ubicaron dentro de un rango de concentración óptima. Para los demás nutrientes las medias de las concentraciones fueron más altas que para las demás provincias.

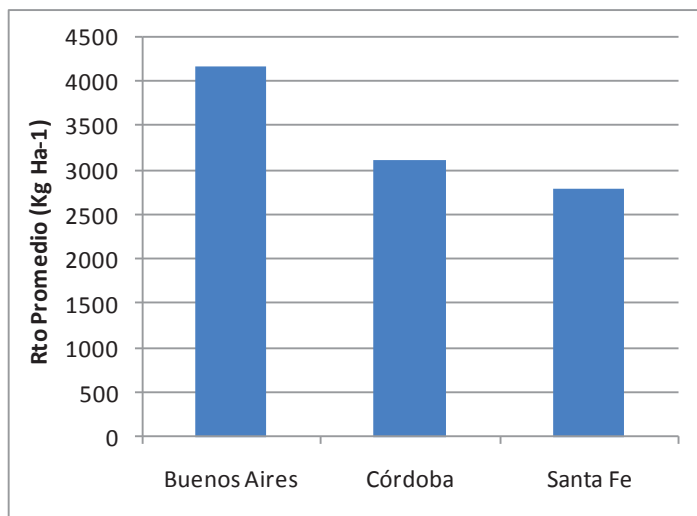


Figura 22. Rendimiento promedio por provincia en kg ha^{-1} .

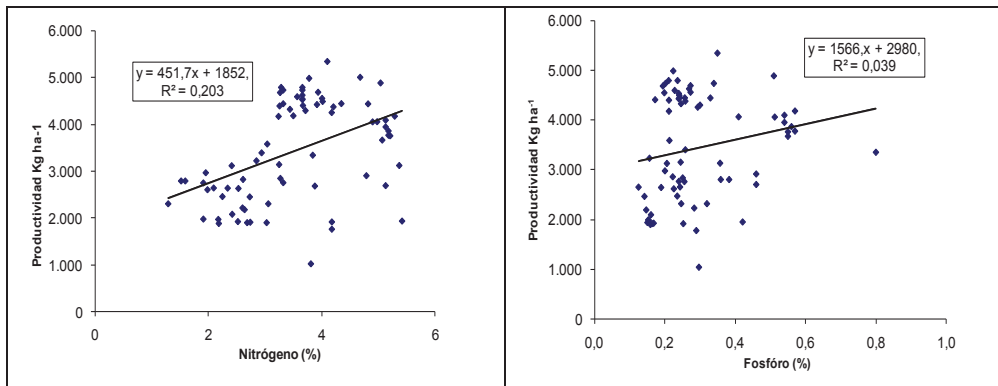
Córdoba, con un rendimiento intermedio entre Buenos Aires y Santa Fe, tuvo una media más alta en la concentración de nitrógeno, fósforo y cobre, sin variar demasiado en las concentraciones medias de los demás nutrientes. En Santa Fe se obtuvo el menor rendimiento promedio, explicado probablemente por un menor estatus nutricional, lo cual está seguramente relacionado con los años de agricultura en esta provincia, que a partir del año 1856, con la inmigración europea, comenzó la etapa de colonización agrícola y ya en 1895 este proceso alcanzó su máxima expansión. En la tabla 9, se observa claramente, medias mucho más bajas, respecto a las demás provincias, para nitrógeno, potasio, azufre y cobre, mientras que para calcio y manganeso las

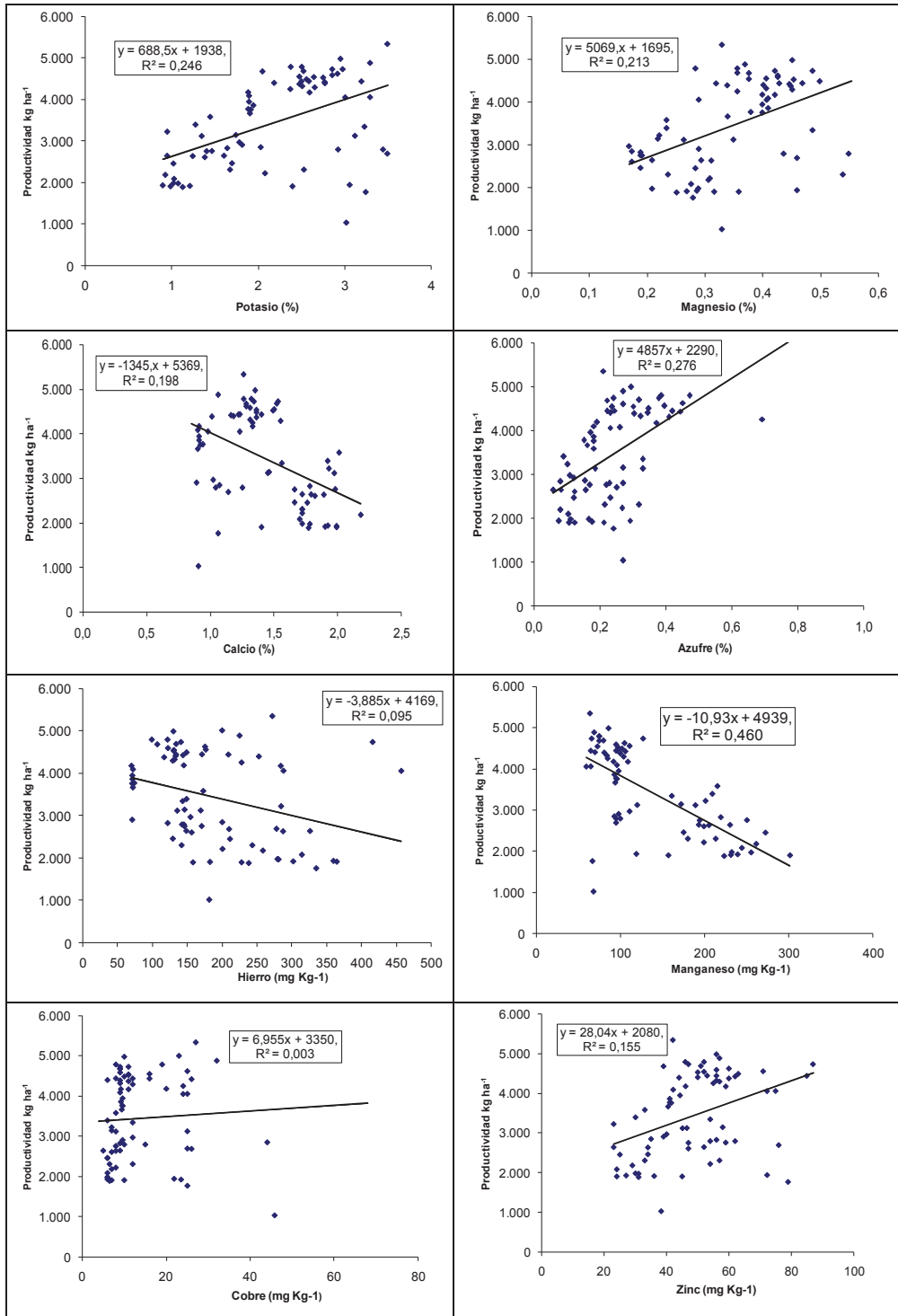
medias fueron más altas que para Córdoba, las cuales no fueron limitantes en la producción.

IV.2.4. Concentración foliar y productividad

Para evaluar tendencias, se graficó la concentración de nutrientes en función del rendimiento y la recta de regresión correspondiente (Figura 23).

Para nitrógeno, fósforo, potasio, azufre, magnesio, zinc y cobre se evidenció una tendencia a incrementar el rendimiento con mayor concentración, observándose por ejemplo para el caso del azufre, nitrógeno y magnesio que la respuesta al aumento de la concentración fue alta (pendiente de la recta); en cambio para cobre el nivel de respuesta al aumento del nutriente fue mucho más baja. Para calcio, hierro, manganeso y boro a medida que aumenta la concentración, el rendimiento tendió a caer, siendo esto mucho más marcado en el caso del manganeso, el que podría ser considerado tóxico en algunos casos.





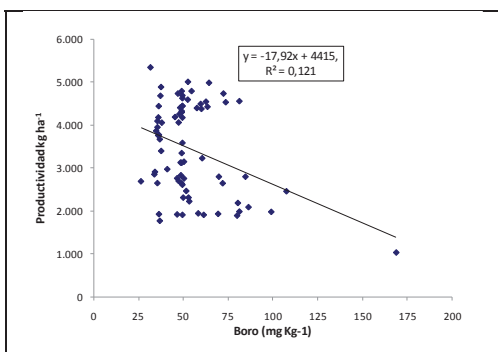


Figura 23. Relación entre concentración foliar y productividad para cada uno de los nutrientes.

IV.3 Método DRIS

IV.3.1. Cálculo de normas DRIS

En el análisis total se consideraron 76 muestras foliares con sus respectivos rendimientos. Al dividir la población en altos y bajos rendimientos, 33 observaciones presentaron producciones iguales o mayores de 3978 kg ha^{-1} , representando un 44% de las poblaciones y 43 observaciones fueron para poblaciones de bajos rendimientos ($<3978 \text{ kg ha}^{-1}$).

En la Tabla 10 se presentan las normas DRIS con el coeficiente de variación, desvío estándar y varianza.

Luego de calculadas las normas con la base de datos local, se realizó una comparación con normas de Estados Unidos (Beverly y Sumner, 1986), normas de Rio Grande del Sur- Brasil (Castamann, 2009) y normas de Mato Grosso del Sur (Hissao Kurihara, 2004) (Anexo 1).

Cabe mencionar que el número de poblaciones con la que se establecieron las normas para los distintos países fue muy distinto, ya que en EE.UU se trabajó con 3500 muestras, en Mato Grosso del Sur con 257 muestras, en Rio Grande do Sur con 35 y con 76 muestras foliares para las normas de este trabajo. Walworth et al. (1988) demostraron que las normas de diagnóstico pueden ser desarrolladas, aún en una población reducida de individuos o de un número reducido de plantas o unidades experimentales, si éstas están realmente en los topes del rendimiento de ese cultivo. Para estos

casos, la población de alto rendimiento a partir de la cual se realizó el cálculo de normas fue, para EE.UU mayor a 3500 kg ha^{-1} , para Mato Grosso mayor a 3900 kg ha^{-1} , para Rio Grande mayor a 3510 kg ha^{-1} y para establecer las normas de este trabajo se tomó un rendimiento a partir de 3978 kg ha^{-1} .

En general, se observaron normas más altas en Estados Unidos para nitrógeno y fósforo, y muy variables para el resto de los nutrientes. Las normas más altas para fósforo pueden deberse al incremento de los niveles de este nutriente en los suelos estadounidenses debido a las fertilizaciones como lo expresó en sus investigaciones Mallarino (2001).

En la comparación con Mato Grosso las diferencias más destacables fueron las normas de hierro, cobre y boro, las cuales fueron mucho más altas en nuestro país, por ejemplo la norma Fe/P en Argentina fue 615,7 y en Mato Grosso fue 29,65; y la norma B/N para Argentina fue 12,97 y en Mato Grosso 1,06.

Tabla 10. Normas DRIS para soja.

| Relación | X | C.V | S | S ² | Relación | X | C.V | S | S ² |
|----------|--------|------|-------|----------------|----------|--------|------|--------|----------------|
| N/P | 14,11 | 0,21 | 2,96 | 8,75 | P/N | 0,07 | 0,23 | 0,02 | 0,00 |
| N/K | 1,54 | 0,28 | 0,42 | 0,18 | K/N | 0,69 | 0,20 | 0,14 | 0,02 |
| N/Ca | 3,27 | 0,31 | 1,02 | 1,03 | Ca/N | 0,33 | 0,23 | 0,08 | 0,01 |
| N/Mg | 10,25 | 0,23 | 2,37 | 5,59 | Mg/N | 0,10 | 0,20 | 0,02 | 0,00 |
| N/Cu | 0,33 | 0,41 | 0,13 | 0,02 | Cu/N | 3,61 | 0,44 | 1,60 | 2,56 |
| N/Zn | 0,07 | 0,25 | 0,02 | 0,00 | Zn/N | 14,16 | 0,22 | 3,15 | 9,95 |
| N/Mn | 0,05 | 0,29 | 0,01 | 0,00 | Mn/N | 22,15 | 0,26 | 5,70 | 32,45 |
| N/Fe | 0,03 | 0,56 | 0,02 | 0,00 | Fe/N | 44,25 | 0,49 | 21,90 | 479,79 |
| N/S | 14,77 | 0,44 | 6,43 | 41,32 | S/N | 0,08 | 0,41 | 0,03 | 0,00 |
| P/K | 0,12 | 0,51 | 0,06 | 0,00 | K/P | 9,77 | 0,29 | 2,81 | 7,91 |
| P/Ca | 0,25 | 0,55 | 0,14 | 0,02 | Ca/P | 4,73 | 0,33 | 1,57 | 2,46 |
| P/Mg | 0,78 | 0,41 | 0,32 | 0,10 | Mg/P | 1,47 | 0,33 | 0,48 | 0,23 |
| P/Cu | 0,02 | 0,52 | 0,01 | 0,00 | Cu/P | 49,66 | 0,42 | 20,87 | 435,35 |
| P/Fe | 0,00 | 0,83 | 0,00 | 0,00 | Fe/P | 615,70 | 0,44 | 270,39 | 73110,02 |
| P/Mn | 0,00 | 0,46 | 0,00 | 0,00 | Mn/P | 315,96 | 0,33 | 105,63 | 11157,48 |
| P/Zn | 0,01 | 0,48 | 0,00 | 0,00 | Zn/P | 202,28 | 0,30 | 60,76 | 3692,12 |
| K/Ca | 2,14 | 0,20 | 0,42 | 0,18 | Ca/K | 0,48 | 0,17 | 0,08 | 0,01 |
| K/Mg | 6,90 | 0,25 | 1,72 | 2,95 | Mg/K | 0,15 | 0,22 | 0,03 | 0,00 |
| K/Cu | 0,22 | 0,35 | 0,08 | 0,01 | Cu/K | 5,30 | 0,41 | 2,16 | 4,66 |
| K/Fe | 0,02 | 0,30 | 0,01 | 0,00 | Fe/K | 63,64 | 0,44 | 27,97 | 782,38 |
| K/Mn | 0,03 | 0,32 | 0,01 | 0,00 | Mn/K | 33,31 | 0,28 | 9,41 | 88,50 |
| B/N | 13,10 | 0,30 | 3,92 | 15,39 | N/B | 0,08 | 0,36 | 0,03 | 0,00 |
| S/P | 1,16 | 0,46 | 0,54 | 0,29 | P/S | 1,16 | 0,66 | 0,76 | 0,58 |
| S/K | 0,12 | 0,40 | 0,05 | 0,00 | K/S | 9,66 | 0,36 | 3,45 | 11,92 |
| S/Ca | 0,24 | 0,33 | 0,08 | 0,01 | Ca/S | 4,48 | 0,28 | 1,24 | 1,54 |
| S/Mg | 0,79 | 0,41 | 0,32 | 0,10 | Mg/S | 1,43 | 0,32 | 0,45 | 0,21 |
| S/Zn | 0,01 | 0,36 | 0,00 | 0,00 | Zn/S | 197,46 | 0,34 | 67,56 | 4564,93 |
| S/Mn | 0,00 | 0,34 | 0,00 | 0,00 | Mn/S | 303,68 | 0,32 | 96,82 | 9373,55 |
| S/Fe | 0,00 | 0,42 | 0,00 | 0,00 | Fe/S | 612,85 | 0,60 | 366,09 | 134022,49 |
| K/Zn | 0,05 | 0,26 | 0,01 | 0,00 | Zn/K | 21,06 | 0,20 | 4,13 | 17,09 |
| Ca/Mg | 3,23 | 0,17 | 0,54 | 0,29 | Mg/Ca | 0,32 | 0,18 | 0,06 | 0,00 |
| Ca/Cu | 0,11 | 0,41 | 0,04 | 0,00 | Cu/Ca | 11,71 | 0,55 | 6,43 | 41,35 |
| Ca/Zn | 0,02 | 0,24 | 0,01 | 0,00 | Zn/Ca | 44,57 | 0,24 | 10,66 | 113,68 |
| Ca/Mn | 0,02 | 0,21 | 0,00 | 0,00 | Mn/Ca | 68,97 | 0,23 | 16,19 | 262,12 |
| Ca/Fe | 0,01 | 0,36 | 0,00 | 0,00 | Fe/Ca | 138,75 | 0,53 | 73,25 | 5365,86 |
| Mg/Cu | 0,03 | 0,43 | 0,01 | 0,00 | Cu/Mg | 37,80 | 0,56 | 21,31 | 454,24 |
| Mg/Fe | 0,00 | 0,45 | 0,00 | 0,00 | Fe/Mg | 448,71 | 0,53 | 240,05 | 57621,85 |
| Mg/Mn | 0,00 | 0,16 | 0,00 | 0,00 | Mn/Mg | 216,57 | 0,14 | 30,43 | 925,92 |
| Mg/Zn | 0,01 | 0,21 | 0,00 | 0,00 | Zn/Mg | 142,34 | 0,27 | 38,10 | 1451,39 |
| Cu/Zn | 0,27 | 0,52 | 0,14 | 0,02 | Zn/Cu | 4,56 | 0,38 | 1,73 | 2,98 |
| Cu/Fe | 0,09 | 0,44 | 0,04 | 0,00 | Fe/Cu | 13,44 | 0,52 | 7,04 | 49,50 |
| Cu/Mn | 0,18 | 0,63 | 0,11 | 0,01 | Mn/Cu | 7,34 | 0,43 | 3,17 | 10,03 |
| Cu/S | 51,48 | 0,60 | 30,82 | 949,67 | S/Cu | 0,03 | 0,45 | 0,01 | 0,00 |
| Zn/Fe | 0,37 | 0,34 | 0,13 | 0,02 | Fe/Zn | 3,10 | 0,42 | 1,31 | 1,72 |
| Mn/Zn | 1,60 | 0,24 | 0,39 | 0,15 | Zn/Mn | 0,67 | 0,32 | 0,22 | 0,05 |
| Fe/Mn | 2,15 | 0,64 | 1,37 | 1,87 | Mn/Fe | 0,61 | 0,49 | 0,30 | 0,09 |
| B/P | 190,57 | 0,40 | 76,44 | 5843,20 | P/B | 0,01 | 0,58 | 0,00 | 0,00 |
| B/K | 19,24 | 0,25 | 4,82 | 23,22 | K/B | 0,06 | 0,30 | 0,02 | 0,00 |
| B/Ca | 39,92 | 0,19 | 7,63 | 58,28 | Ca/B | 0,03 | 0,19 | 0,00 | 0,00 |
| B/Mg | 127,84 | 0,22 | 27,92 | 779,37 | Mg/B | 0,01 | 0,21 | 0,00 | 0,00 |
| B/Cu | 4,28 | 0,44 | 1,90 | 3,61 | Cu/B | 0,31 | 0,63 | 0,19 | 0,04 |
| B/Zn | 0,93 | 0,24 | 0,23 | 0,05 | Zn/B | 1,14 | 0,29 | 0,33 | 0,11 |
| B/Mn | 0,60 | 0,21 | 0,12 | 0,02 | Mn/B | 1,76 | 0,23 | 0,40 | 0,16 |
| B/Fe | 0,35 | 0,39 | 0,14 | 0,02 | Fe/B | 3,63 | 0,61 | 2,22 | 4,92 |
| B/S | 175,61 | 0,27 | 47,83 | 2287,25 | S/B | 0,01 | 0,34 | 0,00 | 0,00 |

X: media; C.V.: coeficiente de variación; D.E.: desvío estándar; Var: varianza.

Hoogerheide (2005), en una tesis de maestría sobre DRIS para establecer el estado nutricional de soja en dos regiones de Brasil, relevó valores de concentración algo más bajos en boro (49 mg kg^{-1}) y mucho más bajos en manganeso y cobre que para nuestra zona (60 y 5 mg kg^{-1} respectivamente). Para magnesio las normas fueron más altas en Mato Grosso, mientras que para fósforo en general se observaron normas similares.

Con respecto a las normas de Rio Grande, para nitrógeno y potasio las normas fueron más bajas en Argentina, en contraste con calcio, azufre, hierro y boro, que mostraron normas más altas en nuestro país. Según los datos relevados por Castamann (2009), las concentraciones foliares de nitrógeno y potasio fueron mayores que los revelados en este trabajo, mientras que para calcio, azufre, hierro y boro las concentraciones foliares fueron mayores en Argentina. Para fósforo, en general se observaron normas de valores similares, pues las concentraciones foliares fueron similares entre países; mientras que para magnesio, manganeso, cobre y zinc no se pudo establecer una relación concreta, ya que las diferencias fueron muy variables. Para manganeso hubo una gran diferencia en los valores promedios observados en Rio Grande y Argentina, 66 y 127 mg kg^{-1} respectivamente, siendo esto muy similar a lo que ocurre en Mato Grosso, Brasil.

En esta comparación entre normas de las diferentes regiones, se observaron claramente diferencias entre los valores generados para poblaciones de diferentes países, lo que demuestra que las normas DRIS no son totalmente independientes de las condiciones locales y, por lo tanto, no pueden ser aplicables directamente en diferentes regiones.

IV.3.2. Índices DRIS

Para todas las muestras se calcularon los índices DRIS para cada nutriente, por el método desarrollado por Beaufils 1973 (1 a 13) y el propuesto por Jones 1981 (14 a 25).

En la tabla 11 se presentan las medias, los máximos y los mínimos de los valores, observándose que éstos varían para cada método.

En el cálculo propuesto por Jones, las medias de los índices de fósforo, hierro y boro fueron algo menores, y mucho más bajas para calcio y

manganeso, coincidiendo con nutrientes que mostraron, en general, concentraciones suficientes y/o en exceso. Para el resto de los nutrientes, las medias fueron mayores según este método.

Al igual que lo planteado por Machado Díaz et al. (2011), para el método de Jones, la amplitud de índices para cada nutriente fue mucho menor, los valores máximos tendieron a hacerse menores y los valores mínimos, que corresponden a valores negativos, a hacerse mayores o más cercanos a cero. Sin embargo, la capacidad de predecir el estado nutricional, como se puede observar, no fue afectada. Los índices para cada nutriente fueron igualmente manifestados como deficientes o en excesos por cualquiera de los métodos.

Según Maya (1999) y Wadt et al. (2007), las fórmulas de Beaufils (1 a 13) tienden a sobreestimar la deficiencia nutricional en comparación con Jones (14 a 25), tal como se observa en la tabla 11.

Tabla 11. Índices DRIS con método de Beaufils y con método de Jones para cada nutriente.

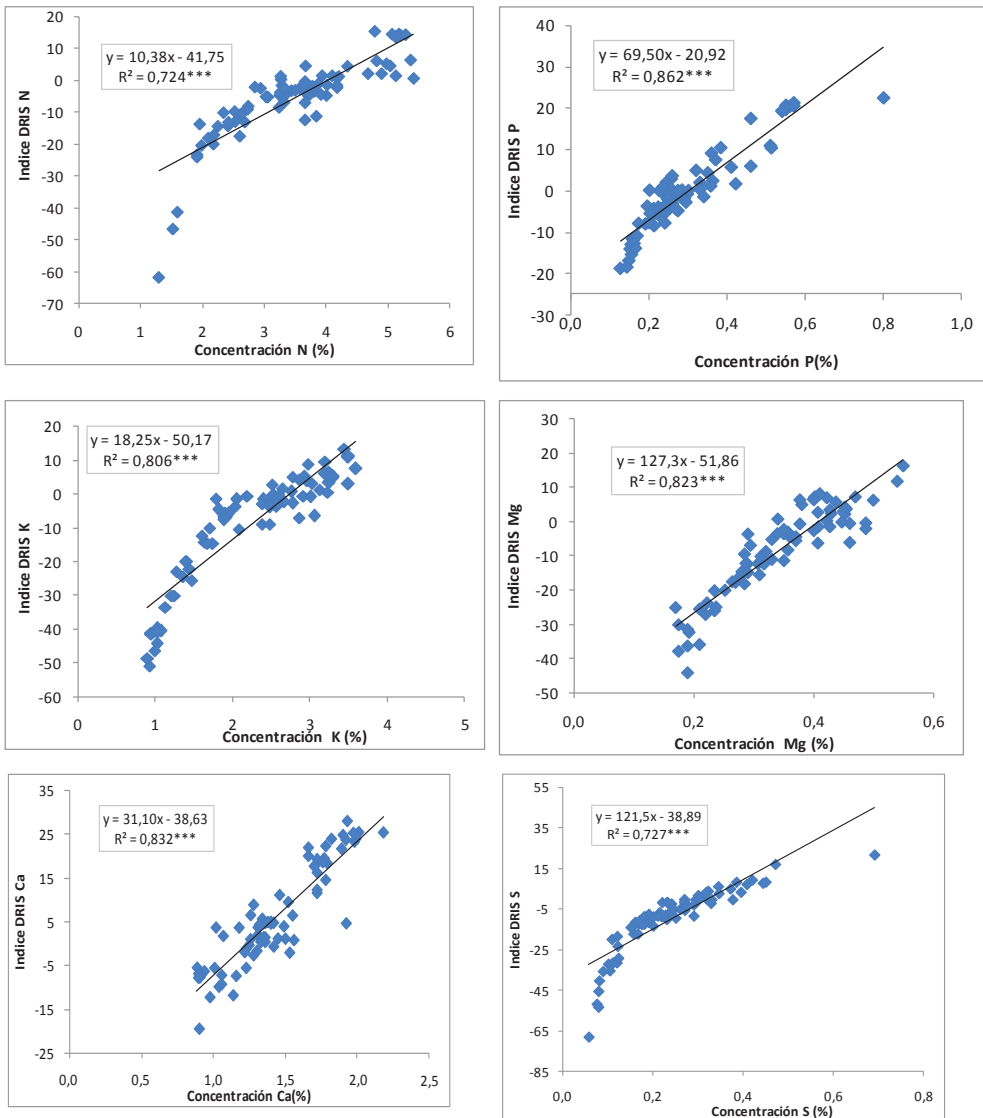
| Nutriente | INDICE DRIS BEAUFILLS | | | INDICE DRIS JONES | | |
|-----------|-----------------------|---------|----------|-------------------|--------|---------|
| | Media | Max | Min | Media | Max | Min |
| N | -7,207 | 24,159 | -98,753 | -5,226 | 15,375 | -61,902 |
| P | 0,001 | 41,692 | -33,830 | -0,317 | 22,518 | -18,894 |
| K | -13,015 | 17,897 | -82,135 | -9,182 | 13,279 | -50,972 |
| Mg | -12,448 | 23,828 | -71,760 | -7,837 | 16,244 | -43,952 |
| S | -13,736 | 38,192 | -117,022 | -10,203 | 21,640 | -68,010 |
| Ca | 11,768 | 74,302 | -31,146 | 5,865 | 27,898 | -19,592 |
| Zn | -7,209 | 22,867 | -57,253 | -4,805 | 16,237 | -35,748 |
| Mn | 35,342 | 158,807 | -32,507 | 22,650 | 91,745 | -17,575 |
| Fe | 5,560 | 60,900 | -27,958 | 3,857 | 34,604 | -14,917 |
| Cu | -6,890 | 64,225 | -38,489 | -2,661 | 39,770 | -19,724 |
| B | 5,889 | 100,345 | -37,927 | 4,499 | 61,963 | -24,321 |

IV.3.3. Índice DRIS y Concentración foliar

Beaufils (1973), destaca que la mayor ventaja del diagnóstico foliar está en el hecho de tomar a la propia planta como extractora de los nutrientes de suelo, permitiendo una validación directa de su estado nutricional por la validación de las concentraciones foliares e indirectamente validar la fertilidad del suelo (Hoogerheide, 2005).

Las relaciones obtenidas entre las concentraciones de nutrientes y sus respectivos índices DRIS calculados por el método de Jones, fueron positivas y significativas ($p < 0,001$) (Figura 24) mostrando que los Índices DRIS dependen fuertemente de la concentración de nutriente en la hoja.

Sin embargo, las relaciones no lineares a bajas y/o altas concentraciones de nutrientes revelan las ventajas de los índices DRIS para el diagnóstico de deficiencias o excesos sobre el método de niveles críticos o rangos de deficiencias.



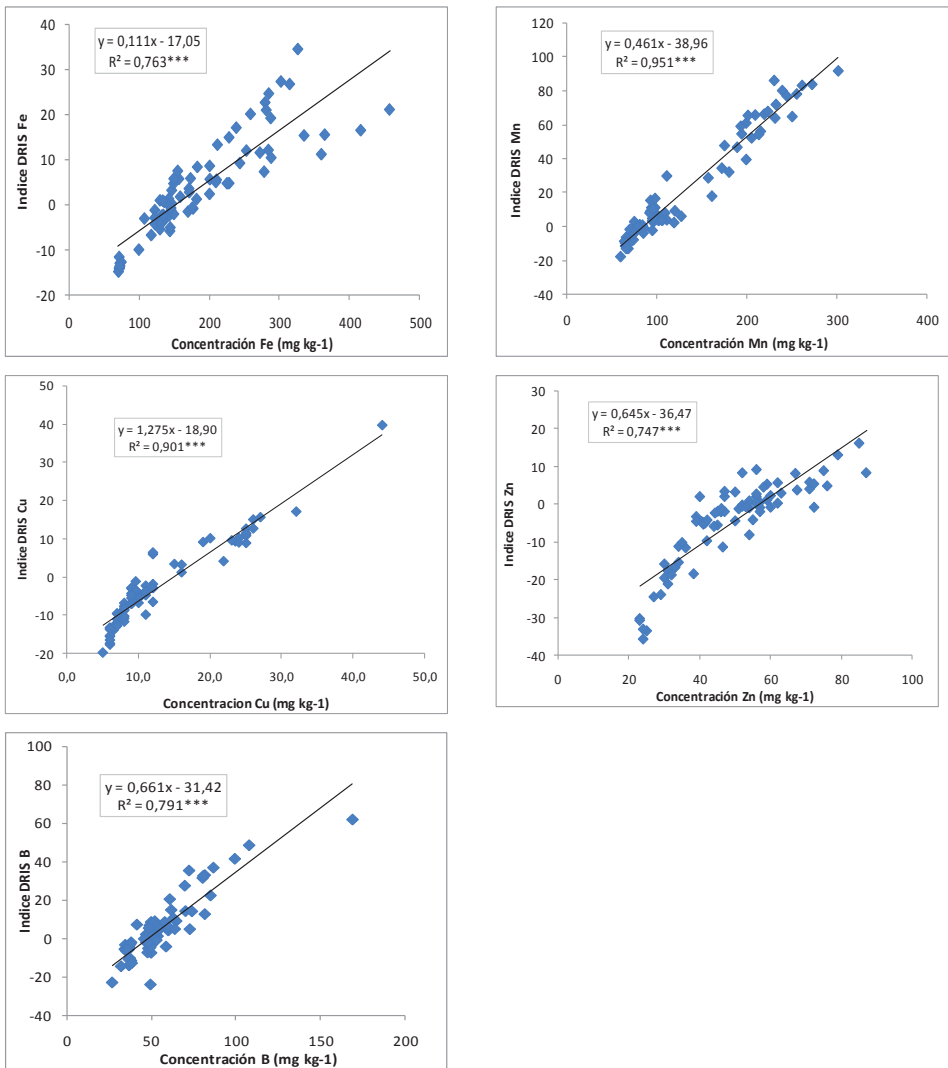


Figura 24. Relación entre los índices DRIS y las concentraciones foliares de cada uno de los nutrientes.

IV.3.4. Índices DRIS y Productividad

En la evaluación de la relación entre la productividad y los índices DRIS para los diferentes métodos de cálculo de las funciones DRIS, se observaron escasas diferencias (Tabla 12). Para calcio, según el método de Jones la relación fue significativa ($p < 0,01$) y según Beaufils ésta relación fue muy significativa ($p < 0,001$). Para fósforo y cobre la relación entre el índice y el rendimiento no fue significativa ($p > 0,1$), para zinc ésta relación fue significativa ($p < 0,01$), encontrándose para nitrógeno, potasio, magnesio azufre, manganeso, hierro y boro una relación lineal muy significativa ($p < 0,001$), para ambos métodos de cálculo.

Una vez planteados los índices, se decidió continuar trabajando con la metodología planteada por Jones (1981), debido a que, como ya fue expresado antes, la amplitud de los índices para cada nutriente fue menor mediante este cálculo. Además, el método planteado por Jones fue mucho más claro y sencillo, donde se utilizó una única fórmula a aplicar, en contrapartida del método de Beaufils (1973), que fue más complejo, ya que la fórmula a utilizar depende de la relación entre el valor de la norma y el de la muestra. Sumado a esto, se presentan diversos debates sobre la veracidad de las fórmulas de Beaufils (1973) (Álvarez y Leite, 1992).

Tabla 12. Relación entre la productividad y los índices DRIS calculados por las fórmulas de Beaufils y Jones.

| Variable | Beaufils (1973) | | Jones (1981) | |
|-----------------|--------------------------|----------------|--------------------------|----------------|
| | Ecuación | R ² | Ecuación | R ² |
| I _N | y=3612,8 + 23,71 x *** | 0,2 | y=3622,9 + 34,63 x *** | 0,18 |
| I _P | y = 3431,8 + 15,22 x NS | 0,06 | y = 3449,1 + 22,72 x NS | 0,04 |
| I _K | y= 3737,9 + 22,74 x *** | 0,29 | y= 3767,8 + 35,49 x *** | 0,29 |
| I _{Mg} | y= 3768,6 + 26,24 x *** | 0,25 | y= 3760 + 40,58 x *** | 0,25 |
| I _S | y= 3730,7 + 21,02 x *** | 0,27 | y= 3806,32 + 35,71 x *** | 0,29 |
| I _{Ca} | y= 3678,6 - 20,11 x *** | 0,21 | y= 3665,6 - 38,13 x ** | 0,17 |
| I _{Zn} | y= 3627,1 + 25,69 x ** | 0,18 | y= 3624,8 + 38,06 x ** | 0,16 |
| I _{Mn} | y= 3881,6 - 12,47 x *** | 0,38 | y= 3930,1 - 21,55 x *** | 0,39 |
| I _{Fe} | y= 3582,11 - 25,21 x *** | 0,19 | y= 3619,4 - 46,01 x *** | 0,22 |
| I _{Cu} | y= 3568,5 + 18,37 x NS | 0,08 | y= 3507,6 + 24,68 x NS | 0,06 |
| I _B | y= 3554,5 - 19,12 x *** | 0,19 | y= 3578,4 - 30,33 x *** | 0,19 |

***: relación muy significativa, p<0,001

** : relación significativa, p<0,01

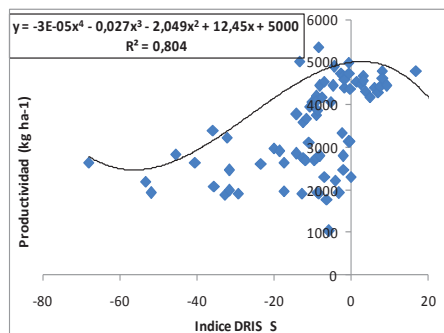
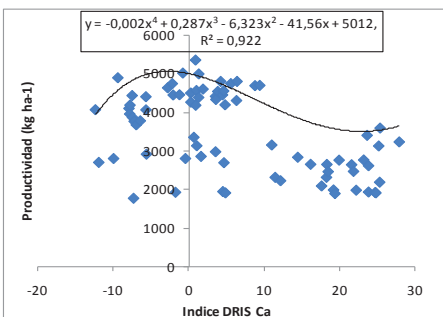
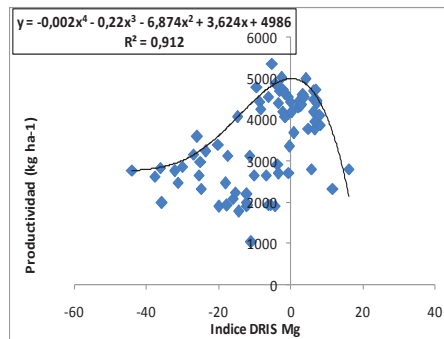
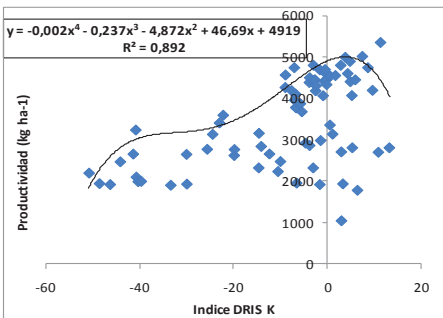
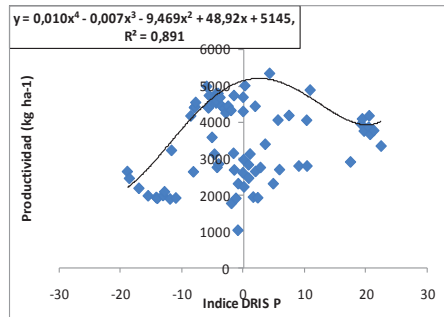
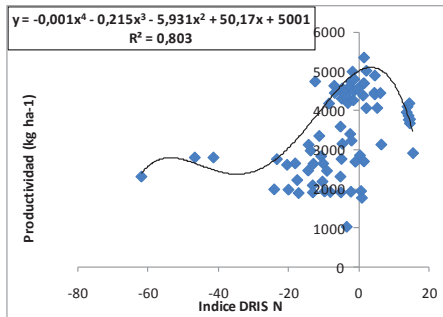
NS : relación no significativa, p> 0,1

En la figura 25, se presenta la relación entre el rendimiento y los índices DRIS de cada nutriente, calculados por el método propuesto por Jones (1981), con el correspondiente ajuste sobre los máximos. Se observó claramente como índices cercanos a cero, estuvieron relacionados a los mayores rendimientos y las curvas mostraron un óptimo en esta zona. Para nitrógeno, potasio, azufre y zinc las curvas desplazadas hacia la izquierda, mostraron que los menores rendimientos estuvieron relacionados a índices DRIS negativos, es decir, por déficit de estos nutrientes. Por el contrario, las curvas de manganeso, hierro, calcio y boro tendieron a desplazarse hacia la derecha significando esto que los menores rindes estuvieron explicados por índices DRIS positivos para estos nutrientes. Para fósforo, magnesio y cobre las curvas se asemejaron a una curva de distribución normal, lo que explicó que los bajos rindes estuvieron asociados, en algunos casos a índices DRIS negativos, y en otros, a índices DRIS positivos (desequilibrio nutricional).

En general, para esta serie de datos, se apreció que con índices DRIS entre valores de -10 y +10 se puede aspirar a rendimientos mayores a 4000 kg ha⁻¹; con índices en el rango -20 a -10 y +10 a +20, se alcanzarían rindes de 3000 a

4000 kg ha⁻¹, y con índices menores de -20 o mayores de +20, los rendimientos no superarían los 3000 kg ha⁻¹.

Teniendo en cuenta estos límites, al observar las gráficas de productividad en función de los índices DRIS, se encontró que las mayores limitaciones están dadas por el siguiente orden de deficiencia: K>Mg>S>Zn>N.



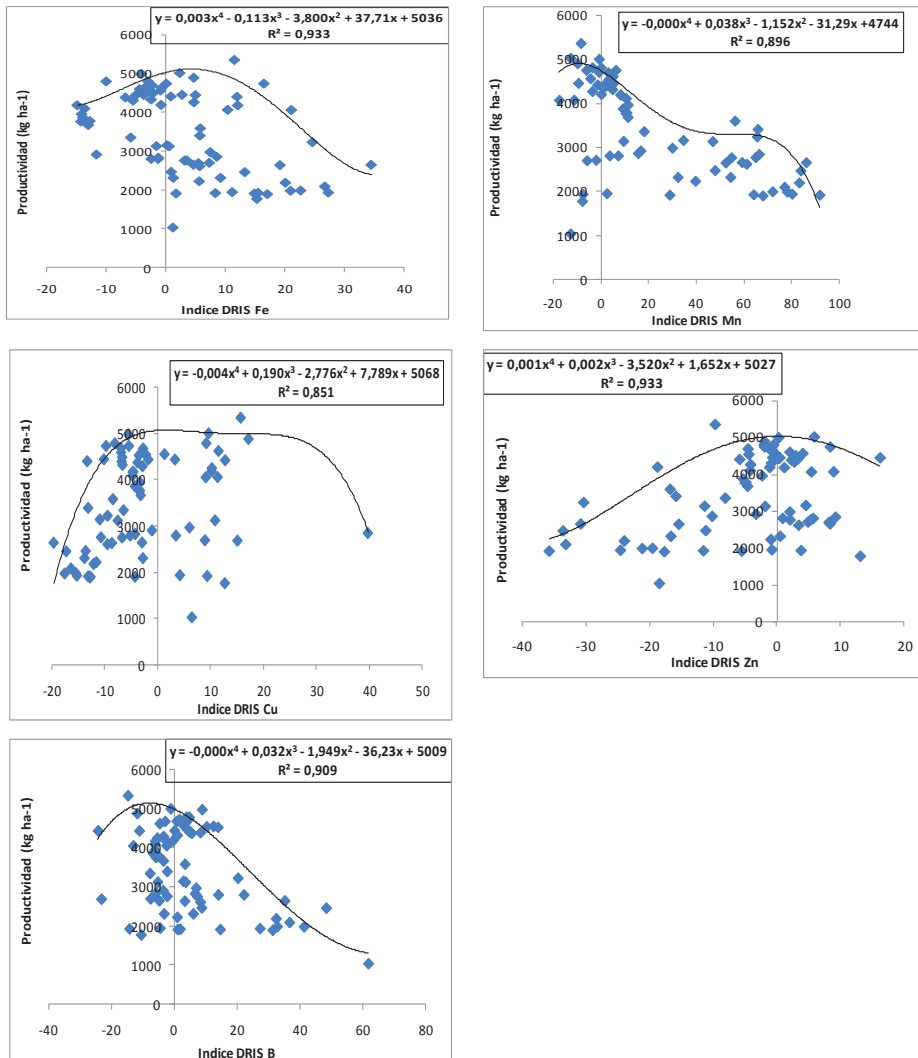


Figura 25. Relación entre los índices DRIS para cada nutriente y la productividad.

IV.3.5. Orden de limitación por deficiencia

Para un total de 101 muestras analizadas, el azufre calificó en primer lugar como nutriente deficiente, seguido por potasio, nitrógeno y magnesio (Anexo 2). Dentro de los macronutrientes, el calcio fue el menos limitante. Entre los micronutrientes, el zinc fue el más limitante mientras que el manganeso fue

el menos limitante, observándose que la mayoría de las muestras presentaron concentraciones en suficiencia, y en algunos casos en exceso, cuando se interpretaron por rangos de suficiencias. La reducción en la absorción del zinc en presencia de considerables cantidades de calcio podría ser una de las causas del déficit de este micronutriente en el suelo. Por tanto, en suelos carbonatados y salinos la disponibilidad de los microelementos en el suelo no depende únicamente de los contenidos elevados de metales totales sino también de otras características edáficas, por ejemplo, la fuerte adsorción en los coloides.

Al comparar los resultados por provincia, en Santa Fe el rendimiento se encontró mayormente limitado por magnesio, potasio y azufre de los macronutrientes y cobre de los micronutrientes, siendo claramente manganeso el nutriente menos limitante. En concordancia con esto Cordone (2007) realizó un monitoreo del estado nutricional del cultivo de soja en la provincia de Santa Fe basado en los métodos de rangos de suficiencia (USA 2000) y de valor crítico (EMBRAPA, 2004), donde expresa que azufre, calcio y magnesio son los macronutrientes que estarían presentando las mayores deficiencias.

Según Cordone (2007), la concentración de nitrógeno aparecería como no limitante, mientras que zinc y cobre serían los micronutrientes que podrían presentarse como deficientes en algunas zonas. Para este trabajo se encontró que en la localidad de Humboldt, Santa Fe, el calcio estaría presentando una importante limitación nutricional, mientras que en las demás localidades de esta provincia no se encontró como limitante.

En la provincia de Córdoba, magnesio y potasio fueron los macronutrientes que más limitaron el rendimiento, siendo zinc y boro los micronutrientes más deficientes. El manganeso también en esta provincia fue el elemento menos limitante para la producción.

En Buenos Aires los nutrientes limitantes fueron fósforo y cobre en primer lugar, siendo de relevancia también nitrógeno, hierro, manganeso, magnesio, azufre y zinc. El nutriente que mostró menor deficiencia fue el calcio. El potasio, si bien presentó deficiencia, para esta provincia, no estaría limitando fuertemente el rendimiento, como se observa en el resto de las provincias. Esto puede estar asociado a diferencias en el tipo de suelo, historia agrícola y manejo del cultivo.

Es importante destacar, que si bien se presenta un orden de deficiencia o importancia, el nutriente es deficiente si su índice DRIS es menor a -10. Esto significa, que si bien el nutriente puede no encontrarse entre los primeros en el orden, puede de igual modo tener un índice de deficiencia.

IV.4. Índice de Balance Nutricional

El índice de balance nutricional (IBN) es la suma de los índices DRIS en valores absolutos de cada uno de los nutrientes. En la figura 26 se observa claramente la relación lineal negativa entre la productividad y el IBN, lo que indica que a medida que el IBN crece la productividad cae. Esto se explica por los índices DRIS alejados de cero, ya sean negativos o positivos, que generan un IBN más alto. Como ya se aclaró en este trabajo, índices DRIS lejanos a cero significan déficit o exceso del nutriente, es decir desbalance nutricional. Se puede ver también, un grupo de datos que, si bien presentaron un bajo IBN, a la vez tuvieron baja productividad. Esto fue atribuible a variables climáticas que afectaron el normal desarrollo de los cultivos, posteriores al momento de muestreo (R1). Se verificó para una población de Córdoba, un estrés hídrico en pleno llenado de granos, lo que causó una baja productividad (1945 kg ha^{-1}). Otro de los ensayos, realizados en Las Bandurrias, provincia de Santa Fe, se vio afectado por inundación y posterior estrés hídrico, con lo cual se vio disminuido el stand de plantas y como consecuencia de esto el rendimiento ($1032,5 \text{ kg ha}^{-1}$). En General Lamadrid, provincia de Buenos Aires, el lote atravesó un marcado estrés hídrico, identificándose también enfermedades fúngicas como Mancha Ojo de Rana (*Cercospora sojina*), con pérdida de área foliar, alcanzando un bajo rendimiento (1771 kg ha^{-1}). En Rio Cuarto, Córdoba, los ensayos se vieron afectados por bajas precipitaciones en el período de floración lo que causó el menor rendimiento (1926 kg ha^{-1}).

Es claro entonces, que el IBN nos indica la probabilidad de obtener altos rendimientos, asociado a una nutrición balanceada. Pero no necesariamente implica que los rendimientos se alcancen, debido a que factores limitantes, no nutricionales, como disponibilidad o exceso de agua, enfermedades, insectos, etc., pueden reducir los rendimientos.

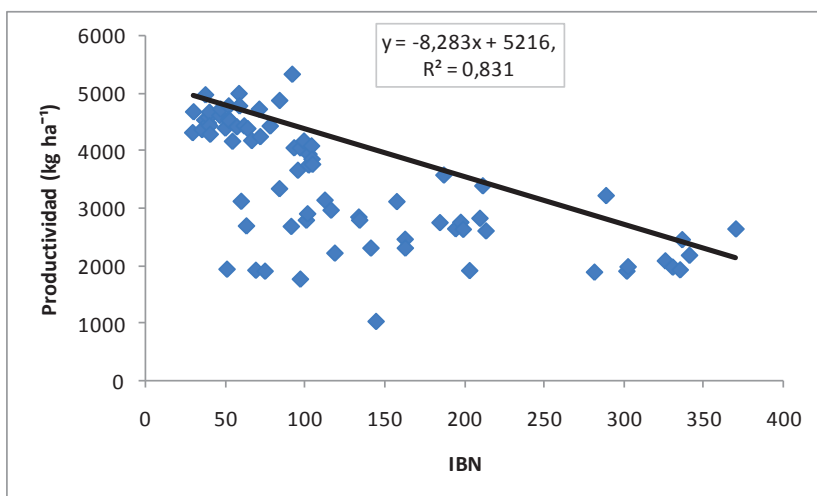


Figura 26. Relación entre el IBN y la Productividad.

Con los datos de IBN y rendimiento se confeccionó la tabla 13, donde se observó el rendimiento promedio para distintos rangos de IBN, con el correspondiente desvío estándar. A medida que aumenta el valor de IBN los rendimientos promedios que se pueden esperar son menores. Los mayores rindes se logran con índices de balance nutricional menores a 100, alcanzándose rendimientos promedios de $4092 \text{ kg ha}^{-1} \pm 929 \text{ kg}$.

Tabla 13. Rendimiento promedio para distintos rangos de IBN.

| IBN | Rendimiento Promedio (kg ha ⁻¹) | Desvío Estándar (kg ha ⁻¹) |
|---------|---|--|
| <100 | 4092 | 929 |
| 100-200 | 2969 | 741 |
| 200-300 | 2648 | 639 |
| 300-400 | 2149 | 269 |

IV.5. Nutrientes deficientes según métodos de interpretación

Los órdenes de deficiencias planteados según distintas interpretaciones realizadas a lo largo de este trabajo difieren, no en los nutrientes que presentan sino en el orden de los mismos. La interpretación por rangos de suficiencias elaborados por EMBRAPA y los confeccionados con los datos para la zona núcleo de Argentina mostraron al nitrógeno como principal nutriente deficiente; siguiendo a éste se encontraron azufre, potasio, fósforo y magnesio en un orden distinto según el rango de suficiencia. En el caso de los rangos propuestos en para Argentina, se sumó a los nutrientes anteriores el zinc como elemento deficiente.

Al realizar la tercera interpretación, donde se observó la productividad en función de los índices DRIS, el orden de los nutrientes varió notablemente, ubicándose potasio en primer lugar, seguido por magnesio, azufre y zinc, mostrando a nitrógeno en quinto lugar de deficiencia.

Tabla 14. Comparación del orden de deficiencia según interpretación o método empleado.

| Interpretación o Método | Orden de deficiencia |
|--|--------------------------------------|
| Rangos de suficiencia EMBRAPA | N>S>P>K>Mg |
| Rangos de Suficiencia Argentina | N>K>S>Mg>P>Zn |
| Método DRIS Interpretación: Productividad en función de Índices DRIS | K>Mg>S>Zn>N |
| Método DRIS Orden de Limitación por deficiencia | S>N>Mg>K>Zn>Cu |

Por último, al realizar el orden de limitación por deficiencia, donde se ordenaron para cada una de las muestras los nutrientes según su índice de menor a mayor, se ubicó al azufre en primer lugar, seguido por nitrógeno,

magnesio, potasio y zinc, apareciendo en este método el cobre como otro nutriente en deficiencia.

Estas interpretaciones fueron realizadas a fines comparativos, pero el orden que se adoptó fue este último, ya que fue realizado según lo propuesto por algunos autores para el método Dris (Walworth y Sumner, 1987).

IV.6. Estatus nutricional del cultivo de soja en Argentina

Para los sistemas de producción de Argentina, el nutriente que limitó mayormente el rendimiento es el azufre, le siguen nitrógeno, magnesio y potasio. Entre los micronutrientes, cobre y zinc fueron los más deficientes, mientras que manganeso, en general presentó desde suficiencia a exceso en nuestro país. De los macronutrientes, el calcio estaría limitando menos el rendimiento en los sitios analizados.

Córdoba, presentó limitantes de magnesio y potasio entre los macronutrientes y de zinc y boro entre los micronutrientes.

Santa Fe, en general, fue la provincia nutricionalmente más pobre en relación a los demás suelos analizados, limitada mayoritariamente por magnesio, potasio y azufre. Entre los micronutrientes el cobre fue el más limitante, mientras que manganeso presentó suficiencia para casi el total de las muestras de esta provincia.

Buenos Aires, mostró estar limitada principalmente por nitrógeno, fósforo y azufre entre los macronutrientes. En micronutrientes hierro y cobre fueron los más limitantes.

CAPITULO V

V.- Conclusiones

Con el objetivo de determinar un método de diagnóstico y recomendación nutricional de los nutrientes más importantes que limitan el crecimiento y la productividad del cultivo de soja en Argentina, se analizaron muestras foliares de soja, procedentes de las provincias de la zona núcleo de producción del país, Buenos Aires, Córdoba y Santa Fe. Para cada muestra se realizaron análisis foliares de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, azufre, magnesio, zinc, cobre, manganeso, hierro y boro; y se llevaron registros de fechas de siembra, plagas, malezas, enfermedades, variables de manejo, climáticas, rendimientos, etc. Luego, se procedió a aplicar el método de rangos de suficiencia y el método DRIS (sistema integrado de diagnóstico y recomendación). La segunda fase de este método, involucra la determinación del índice de balance nutricional, el cual determina la magnitud del balance (o desbalance) nutricional de un cultivo con respecto al valor óptimo del nutriente en el cultivo. Los resultados alcanzados permiten abordar las siguientes conclusiones:

Se elaboraron normas DRIS para el cultivo de soja en Argentina y se observó en la comparación con otros países, que había variaciones importantes en algunos nutrientes. En el caso de Estados Unidos, las diferencias más marcadas se observaron para las normas de fósforo y nitrógeno que fueron más altas que para Argentina. Las regiones de Brasil, Mato Grosso y Rio Grande, mostraron normas más bajas que en Argentina, para hierro y boro, siendo esto atribuible a las menores concentraciones foliares promedios manifestadas para dichas regiones, como reveló en sus investigaciones Castamann (2009). Incluso se observaron diferencias entre normas de estas dos regiones de Brasil, por ejemplo para manganeso y zinc, las cuales fueron mucho más altas en Rio Grande que en Mato Grosso. Estas comparaciones demuestran que sería de gran interés llevar a cabo investigaciones futuras, sobre la universalidad de las normas, que como se mencionó anteriormente, algunos autores afirman que las normas desarrolladas para una región pueden ser aplicadas a otras, siempre que hayan sido desarrolladas para el mismo cultivo.

A partir de las normas DRIS elaboradas en este trabajo, fue posible utilizar el análisis foliar como herramienta para diagnosticar el estado nutricional del cultivo de soja en Argentina. Utilizando estas normas específicas, el método DRIS fue eficiente en el diagnóstico nutricional del cultivo; ya que por un lado, los índices DRIS mostraron una relación de alto ajuste con la concentración del nutriente en hoja, con R^2 mayores a 0,72, lo que evidenció que el método validó correctamente el estado nutricional de la planta. Por otro lado, la productividad y el Índice de Balance Nutricional mostraron una relación inversa de alto ajuste ($R^2=0,83$), siendo esto lógico ya que el desbalance nutricional en el cultivo (alto IBN) genera menores rendimientos.

El sistema DRIS permitió ordenar los nutrientes de forma secuencial, encontrándose que las mayores limitaciones para el cultivo de soja en Argentina están relacionadas a la deficiencia de azufre en primer lugar, seguido por nitrógeno, magnesio y potasio y que entre los micronutrientes zinc, cobre y boro son los más limitantes. Luego, al observar más detalladamente por provincia, se encontraron algunas variaciones para cada región. Para Santa Fe y Córdoba, magnesio, potasio y zinc fueron encontrados como fuertes limitantes para la producción, sumándose azufre y cobre para la provincia de Santa Fe y boro para Córdoba. La provincia de Buenos Aires mostró estar limitada por varios de los elementos estudiados, entre ellos, fósforo, cobre, nitrógeno, hierro, manganeso, magnesio, azufre y zinc; y a diferencia de las otras provincias no reveló problemas en la producción de soja por deficiencia de potasio. Para la zona núcleo argentina, el manganeso no presentó problemas de deficiencias, en general, las muestras presentaron suficiencia y, en algunos casos, excesos de este elemento.

En la provincia de Santa Fe se encontraron, en general, los suelos con el menor estatus nutricional, donde se observaron que las concentraciones foliares medias de nitrógeno, potasio, magnesio, azufre, zinc y cobre, fueron más bajas con respecto a Córdoba y Buenos Aires. Esto también se vio reflejado en el menor rendimiento promedio que presentó esta provincia.

La correlación establecida entre el rendimiento y el IBN, permitirá predecir el rendimiento para distintas situaciones. Efectuando un adecuado diagnóstico nutricional se podrá realizar una recomendación conveniente para corregir del estado nutricional del cultivo, y con esto disminuir el IBN, y como se pudo ver, con valores de IBN menores a 100, se pueden alcanzar los mayores rindes ($4092 \text{ kg ha}^{-1} \pm 929 \text{ kg}$), por supuesto que cuanto más cercano a cero sea este IBN, mayor será el rendimiento esperable.

Conociendo el estatus nutricional y la confiabilidad de que DRIS, es una buena herramienta predictiva en el cultivo de soja, permitiría a nivel productivo mejorar los diagnósticos y recomendaciones nutricionales. La decisión de manejo diferencial para cada zona puede tener varias alternativas en función de las limitantes, con un gran potencial para mejorar la eficiencia de uso de los recursos, e insumos de la producción con los consecuentes efectos positivos sobre el sistema a nivel ambiental y económico.

CAPITULO VI

VI.- Bibliografía

AAPRESID. 2012. Argentina tiene casi el 80% de su agricultura en siembra directa. Disponible en: <http://www.diazdecampo.com/wpcontent/uploads/2012/06/Superficie-en-SD-por-provincias.jpg> (Consultado: 14/05/2014).

Aldana, J.M. 2011. Análisis foliares. Disponible en: <http://www.agroanalisis.com.mx/descargas/intro/analisis-foliar.pdf> (Consultado 19/10/2014).

ALVAREZ, V. y Leite, R. 1992. Fundamentos estatísticos das fórmulas usadas para cálculo dos índices dos nutrientes no Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação-DRIS. Reunião brasileira de fertilidade do solo e nutrição de plantas, 20: 186-187.

BAIGORRI, H. 2002. Manejo del cultivo de la soja en la Argentina. Actualización INTA, SAGPYA. INTA EEA Marcos Juárez.

BANGROO, S.A., Bhat, M.I., Thair Ali, Aziz, M.A., Bhat, M.A. y Mushtaq A. Wani. 2010. Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS)- A Review. International Journal of Current Research, vol.10: 84-97.

BEAUFILS, E.R. 1973. Diagnosis and recommendation integrated system (DRIS). A general scheme for experimentation and calibration based on principles developed from research in plant nutrition. Soil Science, 1: 1-132.

BEAUFILS, E.R. y Sumner, M.E. 1976. Application of the DRIS approach for calibrating soil, plant yield and quality factors of sugarcane. Proc. Sur Africa. Sugar Tech Assc., 50: 118-124.

BEVERLY, R.B. 1993. Re-evaluation reveals weaknesses of DRIS and sufficiency range diagnoses for wheat, corn, and alfalfa. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 24: 487-501.

BEVERLY, R.B., Sumner, M.E. Letzsch, W.S. y Plank, O. 1986. Foliar diagnosis of soybean by DRIS. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, v. 17: 237- 256.

BOLSA DE CEREALES DE ROSARIO. 2014. Informe especial sobre cultivos

GEA – Guía Estratégica para el Agro. N° 54.

BORDOLI, J.M, Barbazán, M.M. y Rocha, L. 2013. Relevamiento nutricional del cultivo de soja en Uruguay. Simposio de Potasio en Sistemas Agrícolas en Uruguay. Mercedes, Soriano, Uruguay.

BORKERT, C.M. y Sfredo, G.J. 1995. La fertilización de los suelos para el cultivo de soja, en: *El cultivo de la soya en los trópicos: Mejoramiento y Producción*. Roma: FAO, 161-169.

BOSCHETTI, G. y Quintero C. 2006. Capítulo I, Parte General. Suelos de la cuenca del Río Paraná: Provincia de Entre Ríos (Argentina), principales aptitudes y limitaciones. En: *Bases para la Conservación de Suelos y Aguas en la Cuenca del Río Paraná*. P: 17- 29.

CABRIA, F., Domínguez, G. y Calandroni, M. 2012. Génesis, clasificación y cartografía de suelos. Fascículo II. *Taxonomía de Suelos*. Mar del Plata, Buenos Aires.

CARPENA-ARTÉS, O. y Carpena-Ruiz, R.O. 1982. Balance nutriente evolutivo: Aplicaciones. *Anal. Edafol. y Agrobiol.*, 41 (7-8): 1355-1371.

CARTA DE SUELOS DE LA REPÚBLICA ARGENTINA. 1998. Departamento Paraná, Provincia de Entre Ríos. Convenio INTA, Gobierno de Entre Ríos.

CORDONE, G., Vidal C., Albretch R., Martínez F., Pescetti H., Casasola E., De Emilio E., Gerster G., Malmantile A., Méndez J., Pagani R., Pabón J., Prieto G. y Trentino N. 2007. Monitoreo del estado nutricional del cultivo de soja en la Provincia de Santa Fe. INTA Oliveros, Santa Fe.

CRESTE, J.E.1996. Tesis de doctorado. Uso do DRIS na avaliacao do estado nutricional do Limoeiro Siciliano. Colegio de Ciencias Agronómicas de Botucatu, Universidad de Estadual Paulista. Botucatu, 1996. 120p.

CRUZATE, G.A. y Rivero, E. (2006). Cobre, hierro y manganeso: mapas de disponibilidad y reposición en suelos de la región pampeana. En: XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, I Reunión de Suelos de la Región Andina, Salta.

CRUZATE, G. y Panigatti, J.L. 2008. Suelos y ambientes de las provincias argentinas. INTA.

DARA, S.T., Fixen P. y Gelderman, R. 1992. Sufficiency level and diagnosis and recommendation integrated system approaches for evaluating the nitrogen status of corn. Agron., 84: 1006-1010.

DIAS MACHADO, J.R., Wadt, P.G., Perez, D.V., Silva, L.M., y Lemos, C.D. 2011. DRIS formulas for evaluation of nutritional status of cupuaçu trees. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.35: 2083-2091.

DÍAZ ZORITA, M.; García, F. y Melgar, R. (coord.). 2002. Fertilización en soja y trigo soja: Respuesta a la fertilización en la región pampeana. Resultados de la red de ensayos del proyecto Fertilizar del INTA. Campaña 200/01 y 2001/02. INTA, 43 pp.

ECHEVERRIA, H. y García, F. 2005. Fertilidad de suelos y fertilidad de cultivos. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

ECHEVERRÍA, H. y García, F. 1998. Guía para la fertilización fosfatada de trigo, maíz, girasol y soja. Boletín técnico No 149. EEA INTA Balcarce.

EMBRAPA 2004. Tecnologías de Producción de Soja. Paraná 2004. Disponible en: <http://www.cnpso.embrapa.br/producaosojaPR/fertilidade.htm> (Consulta: 14/05/2014).

EYHERABIDE, M.; Sainz Rozas, H.; Echeverría, H.; Velasco, J., Barraco, M.; Ferraris, G. y Angelini H. 2012. Niveles de boro disponible en suelos de la región pampeana argentina. XXIII Congreso argentino de la ciencia del suelo. Mar del Plata, Argentina.

EYHERABIDE, M.; Sainz Rozas, H.; Echeverría, H.; Velasco, J., Barraco, M.; Ferraris, G. y Angelini H. 2012. Niveles de cobre disponibles en suelos de la región pampeana argentina. XXIII Congreso argentino de la ciencia del suelo. Mar del Plata, Argentina.

EYHERABIDE, M.; Sainz Rozas, H.; Echeverría, H.; Velasco, J., Barraco, M.; Ferraris, G. y Angelini H. 2012. Niveles de zinc disponibles en suelos de la región pampeana argentina. XXIII Congreso argentino de la ciencia del suelo. Mar del Plata, Argentina.

FERRARIS, G.; Couretot, L. y Ponsa, J. 2005. Utilización de molibdeno, cobalto, boro y otros nutrientes. Agromercado, SOJA, Nº 107: 16-18.

FONTANETTO, H.; Díaz-Zorita, M. y Vivas, H. 2004. Efecto de la inoculación y fertilización con fósforo y azufre sobre la nodulación y los rendimientos de soja. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná. Resúmenes: 143.

FONTANETTO, H.; Keller, O.; Giailevra, D.; Belotti, L. y Negro, C. 2008. Fertilización fosfatada del cultivo de soja en suelos de la región central de Santa Fe. Respuesta física del cultivo, eficiencia de uso del P y niveles críticos en el suelo. XXI Congreso de la AACS. Resúmenes: 3-12: 184.

FONTANETTO, H.; Keller, O.; Sillón, M.; Albrecht, J.; Giailevra, D.; Negro, C. y Belotti, L. 2011. Manejo de la fertilización de la soja en regiones templadas. INTA – E.E.A. Rafaela. Información técnica cultivos de verano, campaña 2011. Publicación Miscelánea N° 121.

GALARZA, C., Gudelj, V. y Vallone, P. 2001. Resumen del trabajo "Fertilización del Cultivo de Soja" Disponible en: <http://www.profertilnutrientes.com.ar/images/archivos/607.pdf> (consultado 22/05/2014).

GARCÍA, F.O. 2002. Manejo de la fertilidad de suelos y fertilización de cultivos para altos rendimientos en la región pampeana Argentina. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.

GARCÍA, F.O. Soja: Nutrición del Cultivo y Fertilización en la Región Pampeana Argentina. *Acassuso, Buenos Aires, Argentina. p 2.*

García, F.O. Soja: Criterios para la fertilización del cultivo. Disponible en: http://agro.unc.edu.ar/~ceryol/documentos/soja/Criterios_fertilizacion.pdf (Consultado 08/01/2015).

GARCIA, F.O. 2005. Soja: Criterios para el manejo de la fertilización del cultivo. Resumen de 101 Ensayos conducidos por INTA, Proyecto INTA Fertilizar, FA-UBA, FCAUNER y CREA Sur de Santa Fe. Congreso Mundo Soja 2005. Buenos Aires, Argentina.

GENTILETTI, A. y Gutiérrez Boem, F. 2004. Fertilización azufrada en soja en centro-sur de Santa Fe. Informaciones agronómicas del cono sur. 24:12-14. INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.

GUINDANI, R.H.P. 2007. DRIS na avaliação do estado nutricional do arroz irrigado em Rio Grande do Sul. Tesis de Maestría. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Brasil.

GUTIERREZ BOEM, F.H. y Scheiner, J.D. Fertilización Fosforada del cultivo de Soja. Disponible en: <http://www.fertilizando.com/articulos/Fertilizacion%20Fosforada%20del%20Cultivo%20de%20Soja.asp> (Consultado: 05/01/2015).

HALLMARK, W.B; Beverly, R; Sumner, M.E.; de Mooy, C.; Morris, H.; Pesek, J. y Fontenot, J. 1990. Soybean phosphorus and potassium requirement evaluation by three M-DRIS data bases. *Agron.*, 82: 323-328.

HOOGERHEIDE, H.C. 2005. DRIS para avaliação do estado nutricional da soja em duas regioes do cerrado brasileiro. Tesis de maestría. Universidade de São Paulo. Piraciaba, São Paulo, Brasil.

INFOSTAT. 2008. InfoStat, versión 2008. Manual del Usuario. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. Primera edición, Editorial Brujas Argentinas.

INTA. 1997. Guía práctica para el cultivo de soja. Buenos Aires, Argentina.

KANIA, E.K. y Callejas, R R. 2011. Sistema Integrado de Diagnóstico y Recomendación (DRIS). Universidad de Chile. Santiago, Chile.

KRAHL, L.L. 2008. Diagnóstico especializado do estado nutricional de uma lavoura de soja. Tesis de maestría. Facultad de Agronomía y veterinaria. Universidad de Brasilia. Brasilia, Brasil.

KRUGER, G.A; Karamanos, R.E y Singh, J.P. 1985. The copper fertility of Saskatchewan soils. *Can. J. Soil Sci.*, 65: 89:-99.

KURIHARA, C.H. 2004. Demanda de nutrientes pela soja e diagnose de seu estado nutricional. Tesis doctoral. Universidad federal de Viçosa. Viçosa. Minas Gerais, Brasil.

LETSCH, W.S. y Summer, M.E. 1984. Effect of population size and yield level on selection of diagnosis and recommendation integrated system (DRIS) norms. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 15: 997-1006.

LUCENA, J.J.; Ruano, S.; García Serrano, P.; Ginés, I. y Mariscal Sancho, I. 2002. Informe DRIS (Diagnosis and Recommendation Integrated System). Madrid.

MALAVOLTA, E.; Vitti, G.C y Oliveira, S.A. 1997. "Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações". Piracicaba. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. Brasil.

MALLARINO, A.F. 2001. Manejo de la fertilización con fósforo y potasio para maíz y soja en el centro-oeste de los Estados Unidos. Actas Jornada de Actualización Técnica para Profesionales .Fertilidad.

MARTÍNEZ, F. y Cordone, G. 1998. Fertilización azufrada en soja. En: UEEA INTA Casilda, Jornadas de Azufre, Casilda (Sta.Fe, Argentina).

MELGAR, R., Vitti, G. y Benites, V. de M. 2011. Fertilizando para altos rendimientos. Soja en Latinoamérica. Boletín N° 20.

MESSICK, D.L. 1992. Soil test interpretation for sulphur in the United States, an overview. *Sulphur in Agriculture*, 16: 24-25.

MOSCATELLI, G. 1990. Atlas de suelos de la República Argentina. Proyecto PNUD. Tomo II.

PARENT, L.E. y Darfir, M. 1992. A theoretical concept of compositional nutrient diagnosis. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 117: 239-242.

PEÑA ZUBIATE, C.A. y Maldonado Pinedo, D. 1990. Atlas de suelos de la República Argentina. Proyecto PNUD. Tomo I.

QUINTERO, C. 2013. Manejo de nutrientes en Entre Ríos. En: Actas Simposio de Fertilidad. P118-124.

QUINTERO, César E. 2009. Factores Limitantes para el crecimiento y productividad del Arroz en Entre Ríos, Argentina. Tesis Doctoral. Universidade da Coruña.

RASMUSSEN, P.E. 1996. Effect of nitrogen, sulfur, and phosphorus sufficiency on nutrient content in white winter wheat. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 27: 585-596.

Ratto de Miguez, S. y Fatta, N. 1990. Disponibilidad de micronutrientos en suelos del área maicera núcleo. *Ciencia del Suelo*, 8: 9-15.

REIS, A. 2002. DRIS norms universality in the corn crop. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 33: 711-735.

RIVERO, E, Cruzate, G.A y Turati, R. 2008. Azufre, boro y zinc: mapas de disponibilidad y reposición en suelos de la Región Pampeana. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Potrero de los Funes, San Luis. Actas en CD, 5pp.

RODRÍGUEZ, O y Rodríguez, V. 2000. Desarrollo, determinación e interpretación de normas DRIS para el diagnóstico nutricional en plantas. Una revisión. P 449-470.

SAINZ ROZAS, H.; González, M.F.; Echeverría, H.; Barbieri, P. y Eyherabide, M. 2013. Mapa de nutrientes 2011. Convenio FERTILIZAR- INTA. Buenos Aires, Argentina.

SCHUNNG, E.; Heym, J. y Achwan, F. 1996. Establishing Critical Values for soil and plant analysis by means of the boundary line development system. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 27 (13&14): 2739-2748.

SINAVIMO. El cultivo de la Soja (*Glycine max* L.) en Argentina. Disponible en: <http://www.sinavimo.gov.ar/cultivo/soja> (consulta: 17/04/2014).

SUMNER, M. 1990. Advances in the use and application of plant analysis. Communications in soil science and plant analysis, v 21: 1409-1430.

SUMNER, M.E. 1986. Diagnosis and recommendation integrated system (DRIS) as a guide to orchard fertilization. International seminar on Leaf Diagnosis as a Guide to Orchard Fertilization. Food and Fertilizer Technology Center for Asia and Pacific Region. Suweon, Korea. Boletin 231. Taiwan.

SUMNER, M.E. y Farina, M.P. 1986. Phosphorus interactions with other nutrients and lime in field cropping systems. Advances in soil science (pp. 201-236). Springer, New York.

SUMNER, M.E. 1981. Diagnosing the sulfur requirement of corn and wheat using foliar analysis. Agron., 45: 86-90.

SUMNER, M.E. 1977. Applications of Beauflis diagnostic indices to maize data published in the literature irrespective of age and conditions. Plant and Soil, 46: 359-369.

SUMNER, M.E. 1977. Preliminary N, P and K foliar diagnosis norms for soybean. Agron. J., 69: 226-230.

SUMNER, M.E. 1977. Preliminary NPK foliar diagnostic norms for wheat. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 8: 149-167.

SUMNER, M.E. 1977. Effect of corn leaf sampled on N, P, K, Ca and Mg content on calculated DRIS indices. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 8: 269-280.

TASI, H.A. y Bourband, J. 1990. Provincia de Entre Ríos. Atlas de Suelos de la República Argentina. Secretaría de Agricultura, Ganadería y pesca. Proyecto PNUD ARG. 85/019. INTA. Centro de Investigaciones de Recursos Naturales.

TORRI, S.L.; Urricariet, S. y Lavado, R.S. 2007. Micronutrientes y otros elementos traza. (9) Pp.189-205 en: ECHEVERRIA, H.E.; GARCIA, F.O. (eds.). Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Vol. 1. 1^{ra} edn. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina. 525 pp.

URANO, E.O.M.; Kurihara, C.H.; Maeda, S.; Vitorino, A.C.T.; Gonçalves, M.C. and Marchetti, M.E. 2006. Avaliação do estado nutricional da soja. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 41: 142-1428,

WALWORTH, J.L. y Sumner, M.E. 1987. The Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS). Advances in Soil Science, v.6: 149-188.

WALWORTH, J., Woodward, J. y Sumner, M.E. 1988. Generation of corn tissue norms from a small high-yield data base. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 19: 563:577.

CAPITULO VII

VII.- Anexos

Anexo 1. Normas DRIS para Argentina, Mato Grosso do Sul, Estados Unidos y Rio Grande do Sul.

| Relación | Argentina | Mato Grosso Do Sul | EE.UU | Rio Grande Do Sul |
|----------|-----------|--------------------|--------|-------------------|
| | Media | Media | Media | Media |
| N/P | 14,11 | 13,80 | 15,20 | 13,40 |
| N/K | 1,54 | 1,95 | 2,63 | 1,44 |
| N/Ca | 3,27 | 4,40 | 5,00 | 6,83 |
| Mg/N | 0,10 | 0,10 | 0,07 | 0,06 |
| N/Cu | 0,33 | 6,11 | 0,80 | 0,50 |
| Zn/N | 14,16 | 1,27 | 6,40 | 8,72 |
| Mn/N | 22,15 | 1,31 | 15,20 | 15,89 |
| Fe/N | 44,25 | 2,21 | 29,40 | 16,76 |
| P/K | 0,12 | 0,15 | 0,17 | 0,12 |
| P/Ca | 0,25 | 0,33 | 0,33 | 0,55 |
| P/Mg | 0,78 | 0,86 | 1,04 | 1,41 |
| P/Cu | 0,02 | 0,46 | 0,05 | 0,04 |
| Fe/P | 615,70 | 29,65 | 439,00 | 220,20 |
| Mn/P | 315,96 | 17,39 | 232,00 | 219,10 |
| Zn/P | 202,28 | 17,50 | 102,00 | 119,00 |
| K/Ca | 2,14 | 2,37 | 2,01 | 4,75 |
| Mg/K | 0,15 | 0,18 | 0,18 | 0,08 |
| K/Cu | 0,22 | 3,32 | 0,30 | 0,35 |
| Fe/K | 63,64 | 4,08 | 75,30 | 24,13 |
| B/N | 12,97 | 1,06 | 6,99 | 4,73 |
| K/Mn | 0,03 | 0,59 | 0,03 | 0,05 |
| Zn/K | 21,06 | 2,44 | 17,30 | 12,51 |
| Mg/Ca | 0,32 | 0,39 | 0,32 | 0,39 |
| Ca/Cu | 0,11 | 1,52 | 0,17 | 0,07 |
| Zn/Ca | 44,57 | 5,38 | 31,60 | 59,27 |
| Mg/Cu | 0,03 | 0,55 | 0,05 | 0,03 |
| Fe/Mg | 448,71 | 24,12 | 447,00 | 298,40 |
| Mn/Mg | 216,57 | 13,85 | 229,00 | 282,60 |
| Zn/Mg | 142,34 | 14,47 | 102,00 | 155,00 |
| Zn/Cu | 4,56 | 7,11 | 4,48 | 4,29 |
| Fe/Cu | 13,44 | 13,04 | 20,30 | 8,25 |
| Cu/Mn | 0,18 | 0,19 | 0,17 | 0,14 |
| Zn/Fe | 0,37 | 0,67 | 0,25 | 0,55 |
| Zn/Mn | 0,67 | 1,19 | 0,53 | 0,58 |
| Mn/Fe | 0,61 | 0,67 | 0,54 | 1,01 |
| B/P | 187,72 | 14,21 | 113,00 | 63,23 |
| K/B | 0,06 | 0,55 | 0,07 | 0,15 |
| B/Ca | 40,58 | 4,66 | 39,40 | 32,38 |
| B/Mg | 128,01 | 11,97 | 117,00 | 83,55 |
| B/Cu | 4,18 | 6,31 | 14,20 | 2,35 |
| Zn/B | 1,15 | 1,24 | 1,05 | 1,86 |
| Mn/B | 1,72 | 1,28 | 2,30 | 3,48 |
| Fe/B | 3,66 | 2,18 | 4,68 | 3,68 |
| Fe/Ca | 138,75 | 8,89 | 144,00 | 113,90 |
| Mn/Ca | 68,97 | 5,28 | 74,90 | 107,80 |

Anexo 2. Índices de diagnóstico DRIS y orden de requerimiento nutricional para 101 muestras de hojas del cultivo de soja.

| Muestra | Provincia | Índices DRIS | | | | | | | | | | | Orden de limitación por deficiencia |
|---------|-----------|--------------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------------------------------------|
| | | N | P | K | Mg | S | Ca | Zn | Mn | Fe | Cu | B | |
| 789 | Santa Fe | -61,90 | 4,92 | -3,02 | 11,76 | 0,09 | 11,45 | 0,55 | 32,22 | 9,23 | -2,81 | -3,25 | N>B>K>Cu>S>Zn>P>Fe>Ca>Mg>Mn |
| 790 | Santa Fe | -5,26 | -5,07 | -22,27 | -25,90 | -12,45 | 25,36 | -16,74 | 56,18 | 5,83 | -8,49 | 3,43 | Mg>K>Zn>S>Cu>N>P>B>Fe>Ca>Mn |
| 791 | Santa Fe | -14,33 | -4,67 | -24,53 | -17,47 | -10,85 | 25,18 | -1,82 | 46,83 | 0,58 | -7,57 | 3,64 | K>Mg>N>S>Cu>P>Zn>Fe>B>Ca>Mn |
| 792 | Santa Fe | -4,98 | -4,24 | -25,69 | -43,95 | -8,79 | 23,19 | 5,35 | 64,85 | 3,56 | -10,76 | -2,23 | Mg>K>Cu>S>N>P>B>Fe>Zn>Ca>Mn |
| 793 | Santa Fe | -23,36 | 2,83 | -19,87 | -32,18 | -12,26 | 19,92 | 2,09 | 54,70 | 3,19 | -6,76 | 7,38 | Mg>N>K>S>Cu>Zn>P>Fe>B>Ca>Mn |
| 794 | Santa Fe | -20,46 | -0,03 | -19,92 | -37,70 | -23,32 | 23,83 | 3,45 | 61,07 | 5,74 | -9,52 | 8,37 | Mg>S>N>K>Cu>P>Zn>Fe>B>Ca>Mn |
| 795 | Santa Fe | -4,73 | -1,57 | -14,61 | -27,00 | -0,26 | 10,99 | 4,58 | 34,51 | 0,23 | -10,97 | 2,91 | Mg>K>Cu>N>P>S>Fe>B>Zn>Ca>Mn |
| 796 | Santa Fe | -17,57 | 0,14 | -10,54 | -15,47 | -3,95 | 12,16 | -0,92 | 39,57 | 5,65 | -11,63 | 0,97 | N>Mg>Cu>K>S>Zn>P>B>Fe>Ca>Mn |
| 797 | Santa Fe | -18,14 | 2,02 | -12,37 | -25,40 | -40,34 | 16,15 | 8,37 | 59,13 | 4,68 | -2,98 | -4,78 | S>Mg>N>K>B>Cu>P>Fe>Zn>Ca>Mn |
| 798 | Santa Fe | -10,77 | 0,89 | -14,13 | -36,17 | -45,52 | 14,44 | 9,23 | 66,30 | -1,24 | -4,28 | 6,62 | S>Mg>K>N>Cu>Fe>P>B>Zn>Ca>Mn |
| 799 | Santa Fe | -2,50 | 3,60 | -23,07 | -20,08 | -35,71 | 23,64 | -15,83 | 65,77 | 5,76 | -13,19 | -2,27 | S>K>Mg>Zn>Cu>N>B>P>Fe>Ca>Mn |
| 800 | Santa Fe | -14,45 | 0,92 | -10,02 | -31,35 | -1,80 | 21,83 | -11,15 | 47,79 | 0,93 | -13,65 | 8,78 | Mg>N>Cu>Zn>K>S>P>Fe>B>Ca>Mn |
| 801 | Santa Fe | -5,28 | -0,79 | -14,66 | -24,83 | -6,74 | 18,25 | -16,63 | 54,33 | 1,29 | -13,88 | 6,08 | Mg>Zn>K>Cu>S>N>P>Fe>B>Ca>Mn |
| 802 | Santa Fe | -13,12 | -1,17 | -1,59 | -4,29 | -8,28 | 4,86 | -5,50 | 28,79 | 1,75 | -4,31 | 1,10 | N>S>Zn>Cu>Mg>K>P>B>Fe<Ca>Mn |
| 803 | Santa Fe | -12,97 | -8,11 | -30,12 | -10,08 | -17,27 | 21,58 | -15,38 | 52,31 | 19,25 | -8,68 | 3,36 | K>S>Zn>N>Mg>Cu>P>B>Fe>Ca>Mn |
| 804 | Santa Fe | -2,12 | -11,69 | -40,98 | -23,60 | -32,12 | 27,90 | -30,33 | 65,50 | 24,71 | -9,50 | 20,33 | K>S>Zn>Mg>P>Cu>N>B>Ca>Fe>Mn |
| 805 | Santa Fe | -10,18 | -18,89 | -41,52 | -6,86 | -68,01 | 18,30 | -30,79 | 86,09 | 34,60 | -19,72 | 35,28 | S>K>Zn>Cu>P>N>Mg>Ca>Fe>B>Mn |
| 806 | Santa Fe | -24,12 | -13,06 | -39,81 | -12,27 | -31,51 | 19,19 | -19,52 | 71,96 | 22,73 | -15,50 | 32,90 | K>S>N>Zn>Cu>P>Mg>Ca>Fe>B>Mn |
| 807 | Santa Fe | -20,06 | -15,50 | -40,46 | -35,73 | -17,32 | 22,19 | -21,12 | 78,15 | 21,04 | -17,64 | 41,43 | K>Mg>Zn>N>Cu>S>P>Fe>Ca>B>Mn |
| 808 | Santa Fe | -17,17 | -11,92 | -33,49 | -19,96 | -32,66 | 19,38 | -17,65 | 67,87 | 17,12 | -12,83 | 31,43 | K>S>Mg>Zn>N>Cu>P>Fe>Ca>B>Mn |
| 809 | Santa Fe | -9,80 | -14,18 | -48,74 | -12,11 | -51,82 | 23,83 | -24,55 | 80,14 | 27,39 | -15,33 | 27,36 | S>K>Zn>Cu>P>Mg>N>Ca>B>Fe>Mn |
| 810 | Santa Fe | -8,15 | -10,98 | -30,05 | -17,65 | -12,63 | 24,71 | -11,51 | 64,01 | 8,37 | -13,18 | 1,91 | K>Mg>Cu>S>Zn>P>N>B>Fe>Ca>Mn |
| 811 | Santa Fe | -10,39 | -17,01 | -50,97 | -12,18 | -53,30 | 25,30 | -23,95 | 83,15 | 20,17 | -12,14 | 32,54 | S>K>Zn>P>Mg>Cu>N>Fe>Ca>B>Mn |
| 812 | Santa Fe | -9,11 | -18,57 | -44,29 | -18,07 | -31,48 | 18,47 | -33,56 | 83,82 | 13,33 | -17,33 | 48,52 | K>Zn>S>P>Mg>Cu>N>Fe>Ca>B>Mn |
| 813 | Santa Fe | -13,17 | -12,82 | -40,86 | -15,93 | -35,42 | 17,60 | -33,14 | 76,97 | 26,82 | -16,43 | 36,80 | K>S>Zn>Cu>Mg>N>P>Ca>Fe>B>Mn |

Continúa

Anexo 2. Continuación

| Muestra | Provincia | Índices DRIS | | | | | | | | | | | Orden de limitación por deficiencia |
|---------|-----------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|-------------------------------------|
| | | N | P | K | Mg | S | Ca | Zn | Mn | Fe | Cu | B | |
| 814 | Santa Fe | -5,14 | -14,00 | -46,45 | -12,31 | -29,21 | 24,80 | -35,75 | 91,74 | 14,95 | -12,75 | 14,69 | K>Zn>S>P>Cu>Mg>N>B>Fe>Ca>Mn |
| 815 | Córdoba | 0,15 | -4,29 | -12,57 | -19,36 | -3,12 | -2,75 | -20,55 | 9,08 | 0,87 | 55,69 | -2,93 | Zn>Mg>K>P>S>B>Ca>N>Fe>Mn>Cu |
| 816 | Córdoba | 6,35 | 5,34 | 5,50 | -16,41 | -6,08 | -8,34 | -13,61 | 18,59 | 4,39 | -1,91 | 6,25 | Mg>Zn>Ca>S>Cu>Fe>P>K>B>N>Mn |
| 817 | Bs As | 10,27 | 3,93 | 8,56 | -13,27 | 8,33 | 2,84 | -6,60 | 21,37 | 0,46 | -23,51 | -11,49 | Cu>Mg>B>Zn>Fe>Ca>P>S>K>N>Mn |
| 818 | Bs As | 0,27 | -4,00 | -3,78 | -30,00 | -14,05 | 1,62 | -10,15 | 15,53 | 8,60 | 39,77 | -5,83 | Mg>S>Zn>B>P>K>N>Ca>Fe>Mn>Cu |
| 819 | Bs As | -13,76 | 0,10 | -1,42 | -24,98 | -19,93 | 3,54 | 2,06 | 29,90 | 7,50 | 6,01 | 6,99 | Mg>S>N>K>P>Zn>Ca>Cu>B>Fe>Mn |
| 820 | Córdoba | 3,39 | 11,38 | 8,36 | -15,59 | -4,45 | 0,82 | -5,81 | 23,36 | -0,18 | -15,95 | -5,92 | Cu>Mg>B>Zn>S>Fe>Ca>N>K>P>Mn |
| 821 | Córdoba | 2,64 | 9,48 | 6,67 | -11,43 | -16,31 | 5,54 | -7,42 | 24,09 | -3,57 | -4,29 | -9,23 | S>Mg>B>Zn>Cu>Fe>N>Ca>K>P>Mn |
| 822 | Córdoba | -4,67 | 19,74 | -1,23 | -17,98 | 4,23 | -2,22 | -4,56 | 13,59 | -10,30 | 10,70 | -6,37 | Mg>Fe>B>N>Zn>Ca>K>S>Cu>Mn>P |
| 823 | Córdoba | 3,46 | -5,29 | 11,43 | -11,00 | -6,31 | 3,91 | -7,03 | 21,20 | -3,69 | -6,35 | -1,67 | Mg>Zn>Cu>S>P>Fe>B>N>Ca>K>Mn |
| 824 | Córdoba | 3,77 | -0,63 | 15,57 | -11,52 | -9,91 | 5,36 | -8,95 | 23,46 | -4,10 | -8,16 | -7,18 | Mg>S>Zn>Cu>B>Fe>P>N>Ca>K>Mn |
| 825 | Córdoba | -2,17 | -1,32 | 9,19 | -9,73 | -5,80 | 4,45 | -0,92 | 26,61 | -5,68 | -7,15 | -8,76 | Mg>B>Cu>S>Fe>N>P>Zn>Ca>K>Mn |
| 826 | Córdoba | -1,17 | -2,35 | 8,96 | -8,49 | -11,03 | 6,68 | -4,53 | 23,37 | -5,61 | -8,50 | -0,06 | S>Cu>Mg>Fe>Zn>P>N>B>Ca>K>Mn |
| 827 | Córdoba | 6,76 | -2,19 | 4,31 | -12,92 | -2,00 | 5,45 | -5,74 | 28,14 | -5,23 | -8,59 | -8,67 | Mg>B>Cu>Zn>Fe>P>S>K>Ca>N>Mn |
| 828 | Córdoba | -2,48 | -4,31 | -15,75 | 0,38 | 25,13 | -13,17 | -6,14 | 1,06 | -1,67 | 8,77 | 10,75 | K>Ca>Zn>P>N>Fe>Mg>Mn>Cu>B>S |
| 829 | Córdoba | -8,08 | -5,12 | -22,59 | 6,59 | 6,83 | -7,44 | -10,43 | 6,77 | -1,08 | 25,68 | 10,32 | K>Zn>N>Ca>P>Fe>Mg>Mn>S>B>Cu |
| 830 | Córdoba | -1,19 | -5,56 | -23,14 | 3,93 | 10,73 | -10,84 | -14,71 | 5,77 | 3,98 | 33,75 | -0,84 | K>Zn>Ca>P>N>B>Mg>Fe>Mn>S>Cu |
| 831 | Córdoba | -1,30 | -6,01 | -18,42 | 3,72 | 16,85 | -10,57 | -4,29 | 5,32 | 8,29 | 1,53 | 7,08 | K>Ca>P>Zn>N>Cu>Mg>Mn>B>Fe>S |
| 832 | Córdoba | -10,61 | -1,02 | -12,69 | 4,35 | -0,08 | -8,59 | -5,10 | 6,33 | -6,01 | 27,73 | 6,58 | K>N<Ca>Fe>Zn>P>S>Mg>Mn>B>Cu |
| 833 | Córdoba | 2,29 | -5,02 | -17,81 | 3,86 | 10,55 | -13,38 | -5,43 | 1,28 | -4,39 | 19,72 | 10,29 | K>Ca>Zn>P>Fe>Mn>N>Mg>B>S>Cu |
| 834 | Córdoba | -12,03 | -1,10 | -13,96 | 4,98 | 30,85 | -14,64 | -6,96 | 0,37 | -7,46 | 12,82 | 9,83 | Ca>K>N>Fe>Zn>P>Mn>Mg>B>Cu>S |
| 835 | Córdoba | 0,95 | -3,00 | -14,89 | 3,72 | 22,19 | -20,44 | -9,59 | -1,79 | -5,01 | 19,52 | 10,96 | Ca>K>Zn>Fe>P>Mn>N>Mg>B>Cu>S |
| 836 | Bs As | -11,30 | 22,52 | 0,58 | -0,35 | -2,17 | 0,67 | -8,09 | 18,03 | -5,89 | -6,47 | -7,73 | N>Zn>B>Cu>Fe>S>Mg>K>Ca>Mn>P |
| 837 | Bs As | -1,66 | -4,38 | 2,88 | -9,41 | 16,99 | 6,39 | -1,98 | -0,02 | -2,96 | -8,12 | 3,94 | Mg>Cu>P>Fe>Zn>N>Mn>K>B>Ca>S |
| 838 | Bs As | -6,88 | -2,44 | -2,65 | 2,41 | 9,27 | 4,46 | 0,48 | 3,28 | -3,69 | -1,80 | -24,32 | B>N>Fe>K>P>Cu>Zn>Mg>Mn>Ca>S |

Continúa

Anexo 2. Continuación

| Muestra | Provincia | Índices DRIS | | | | | | | | | | | Orden de limitación por deficiencia |
|---------|-----------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------------------------------------|
| | | N | P | K | Mg | S | Ca | Zn | Mn | Fe | Cu | B | |
| 839 | Bs As | 1,24 | -3,77 | -1,59 | 6,37 | -1,79 | 8,78 | -4,51 | 3,00 | -3,10 | -2,77 | -2,94 | Zn>P>Fe>B>Cu>S>K>N>Mn>Mg>Ca |
| 840 | Bs As | -3,82 | -5,66 | 4,94 | -3,49 | 6,07 | -5,69 | -5,83 | 1,17 | 12,02 | -6,84 | 8,38 | Cu>Zn>Ca>P>N>Mg>Mn>K>SFe |
| 841 | Bs As | -2,57 | -4,38 | 4,38 | 3,46 | -1,50 | 1,88 | 2,05 | 4,93 | -4,38 | -6,96 | 2,77 | Cu>Fe>P>N>S>Ca>Zn>B>Mg>K>Mn |
| 842 | Bs As | -8,52 | -8,54 | -2,50 | 0,22 | 4,90 | 0,91 | 1,19 | 8,16 | 12,15 | -4,73 | -2,51 | P>N>Cu>B>K>Mg>Ca>Zn>S>Mn<Fe |
| 843 | Bs As | -4,87 | 0,01 | -2,40 | 2,22 | 7,12 | 6,32 | -0,83 | 4,76 | -5,48 | -2,88 | -3,42 | Fe>N>B>Cu>K>Zn>P>Mg>Mn>Ca>S |
| 844 | Bs As | -3,25 | -1,97 | -0,14 | 2,74 | 3,82 | 3,59 | 2,76 | 0,94 | -2,46 | -6,68 | 1,00 | Cu>N>Fe>P>K>Mn>B>Mg>Zn>Ca>S |
| 845 | Bs As | -41,41 | 9,09 | 13,28 | 5,74 | -2,05 | -0,45 | 0,93 | 7,15 | -1,28 | -5,21 | 14,08 | N>Cu>S>Fe>Ca>Zn>Mg>Mn>P>K>B |
| 846 | Bs As | -1,84 | -5,95 | 3,85 | 4,25 | -0,44 | 1,32 | 0,30 | -0,84 | -4,09 | -5,58 | 8,91 | P>Cu>Fe>N>Mn>S>Zn>Ca>K>Mg>B |
| 847 | Bs As | -2,33 | -5,54 | 8,70 | 6,96 | -2,45 | 5,57 | -1,91 | -6,20 | 0,10 | -5,46 | 1,68 | Mn>P>Cu>S>N>Zn>Fe>B>Ca>Mg>K |
| 848 | Bs As | -46,72 | 10,43 | 5,35 | 16,24 | -7,97 | -9,98 | 5,74 | 3,57 | -2,43 | 3,44 | 22,25 | N>Ca>S>Fe>Cu>Mn>K>Zn>P>Mg>B |
| 849 | Bs As | -0,39 | -7,74 | 1,74 | -0,64 | 1,69 | 4,61 | -0,18 | -4,48 | -2,79 | -2,23 | 10,37 | P>Mn>Fe>Cu>Mg>N>Zn>S>K>Ca>B |
| 850 | Bs As | -12,46 | -1,50 | -7,06 | -2,01 | -0,40 | -2,19 | 8,39 | 6,19 | 16,54 | -9,79 | 4,63 | N>Cu>K>Ca>Mg>P>S>B>Mn>Zn>Fe |
| 851 | Bs As | -3,48 | -4,41 | 0,62 | 3,71 | -6,97 | 3,84 | -4,38 | 3,36 | -4,16 | -3,58 | 13,96 | S>P>Zn>Fe>Cu>N>K>Mn>Mg>Ca>B |
| 852 | Bs As | 1,44 | 0,01 | -0,48 | -3,21 | 3,19 | 9,40 | -1,18 | -0,95 | -2,28 | -6,98 | 0,79 | Cu>Mg>Fe>Zn>Mn>K>P>B>N>S>Ca |
| 853 | Bs As | -1,54 | 0,86 | 0,63 | -1,78 | -1,82 | 7,57 | -1,52 | -4,26 | -5,88 | -1,20 | 8,02 | Fe>Mn>S>Mg>N>Zn>Cu>K>P>Ca>B |
| 854 | Bs As | 4,50 | -7,97 | -0,68 | 7,25 | -1,65 | 3,54 | 3,28 | -1,52 | 0,87 | -13,36 | 5,22 | Cu>P>S>Mn>K>Fe>Zn>Ca>N>B>Mg |
| 855 | Bs As | -1,33 | -4,08 | -2,95 | -3,00 | 8,22 | 4,22 | -0,49 | -3,69 | -10,0 | 9,18 | 4,78 | Fe>P>Mn>Mg>K>N>Zn>P>Ca>B>S>Cu |
| 856 | Bs As | -1,44 | -5,32 | -3,77 | 6,25 | 2,65 | 0,26 | 2,98 | 3,72 | -2,11 | -6,73 | 3,95 | Cu>P>K>Fe>N>Ca>S>Zn>Mn>B>Mg |
| 857 | Bs As | 1,20 | -3,09 | -3,84 | 2,99 | -0,08 | 1,30 | 2,32 | 4,26 | -6,79 | -3,82 | 5,55 | Fe>K>Cu>P>S>N>Ca>Zn>Mg>Mn>B |
| 858 | Bs As | -1,61 | -2,82 | -8,99 | -8,24 | 21,64 | 0,27 | -4,10 | -3,68 | 4,76 | 10,24 | -5,41 | K>Mg>B>Zn>Mn>P>N>Ca>Fe>Cu>S |
| 859 | Bs As | -4,78 | -4,88 | -8,94 | -6,23 | 3,28 | 1,01 | 4,09 | 4,10 | -0,88 | 1,28 | 12,51 | K>Mg>P>N>Fe>Ca>Cu>S>Zn>Mn>B |
| 860 | Bs As | 4,39 | -3,50 | -0,14 | 7,22 | -4,49 | -1,24 | -0,64 | 5,27 | 2,76 | -10,19 | 0,10 | Cu>S>P>Ca>Zn>K>B>Fe>N>Mn>Mg |
| 861 | Bs As | -7,03 | -4,58 | -0,63 | -1,45 | 8,28 | -2,81 | -0,74 | 4,09 | -0,68 | 11,50 | -4,63 | N>B>P>Ca>Mg>Zn>Fe>K>Mn>S>Cu |
| 862 | Bs As | -4,45 | -7,85 | -2,77 | -0,11 | 7,73 | -7,52 | 0,32 | 3,80 | -5,10 | 12,76 | 4,70 | P>Ca>Fe>N>K>Mg>Zn>Mn>B>S>Cu |
| 863 | Bs As | -9,18 | 8,12 | -0,40 | 0,12 | 2,56 | -1,35 | 1,09 | 0,35 | -4,26 | 5,59 | -2,01 | N>Fe>B>Ca>K>Mg>Mn>Zn>S>Cu>P |

Anexo 2. Continuación

| Muestra | Provincia | Índices DRIS | | | | | | | | | | | Orden de limitación por deficiencia |
|---------|-----------|--------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|-------------------------------------|
| | | N | P | K | Mg | S | Ca | Zn | Mn | Fe | Cu | B | |
| 864 | Bs As | -6,68 | 0,42 | -6,23 | -10,28 | 15,37 | -3,34 | -6,65 | 6,19 | -2,49 | 10,19 | 5,36 | Mg>N>Zn>K>Ca>Fe>P>B>Mn>Cu>S |
| 865 | Bs As | -6,11 | 3,76 | 13,16 | 1,12 | -7,78 | 0,36 | -0,86 | -4,16 | -7,13 | 5,81 | 0,61 | S>Fe>N>Mn>Zn>Ca>B>Mg>P>Cu>K |
| 866 | Bs As | -7,85 | 1,78 | 5,94 | 8,21 | -12,73 | -11,28 | -0,68 | 4,54 | 0,94 | 14,25 | -3,78 | S>Ca>N>B>Zn>Fe>P>Mn>K>Mg>Cu |
| 867 | Bs As | -8,62 | -2,51 | -1,42 | -6,69 | -8,64 | -4,68 | -3,49 | 2,50 | -5,70 | 33,97 | 4,72 | S>N>Mg>Fe>Ca>Zn>P>K>Mn>B>Cu |
| 868 | Córdoba | 1,41 | 5,94 | 3,00 | -0,50 | -9,43 | -11,94 | 4,90 | -2,13 | 7,32 | 8,94 | -7,58 | Ca>S>B>Mn>Mg>N>K>Zn>P>Fe>Cu |
| 869 | Chaco | 6,35 | 1,13 | 1,14 | -11,32 | -0,40 | 1,05 | -11,33 | 9,40 | -1,55 | 10,86 | -5,27 | Zn>Mg>B>Fe>S>Ca>P>K>N>Mn>Cu |
| 870 | Bs As | 1,44 | 4,32 | 11,39 | -5,15 | -8,44 | 0,89 | -9,67 | -8,49 | 11,57 | 15,69 | -14,76 | B>Zn>Mn>S>Mg>Ca>N>P>K>Fe>Cu |
| 871 | Bs As | 5,19 | 5,69 | 5,26 | -14,81 | -5,19 | -12,39 | 8,94 | -11,32 | 10,44 | 11,33 | -2,46 | Mg>Ca>Mn>S>B>N>K>P>Zn>Fe>Cu |
| 872 | Bs As | 6,08 | 1,97 | 5,99 | -8,65 | -8,02 | -2,08 | 16,24 | -9,53 | 5,02 | 3,26 | -11,13 | B>Mn>Mg>S>Ca>P>Cu>Fe>K>N>Zn |
| 873 | Bs As | 0,83 | -1,90 | 6,46 | -14,52 | -6,20 | -7,33 | 13,12 | -7,91 | 15,38 | 12,69 | -10,57 | Mg>B>Mn>Ca>S>P>N>K>Cu>Zn>Fe |
| 874 | Santa Fe | 15,38 | 17,52 | -4,64 | -3,60 | -18,46 | -5,62 | -3,25 | 16,64 | -11,67 | -1,10 | -3,56 | S>Fe>Ca>K>Mg>B>Zn>Cu>N>Mn>P |
| 875 | Santa Fe | 14,47 | 20,73 | -5,44 | 0,76 | -11,45 | -6,97 | -4,57 | 11,26 | -13,04 | -3,23 | -3,44 | Fe>S>Ca>K>Zn>B>Cu>Mg>Mn>N>P |
| 876 | Santa Fe | 14,51 | 21,33 | -6,74 | 4,98 | -14,04 | -6,44 | -4,86 | 10,74 | -12,78 | -3,40 | -4,72 | S>Fe>K>Ca>Zn>B>Cu>Mg>Mn>N>P |
| 877 | Santa Fe | 14,15 | 19,74 | -6,60 | 6,63 | -8,93 | -7,25 | -4,97 | 10,31 | -14,27 | -3,44 | -5,87 | Fe>S>Ca>K>B>Zn>Cu>Mg>Mn>N>P |
| 878 | Santa Fe | 14,08 | 20,49 | -5,74 | 8,12 | -8,73 | -7,48 | -5,25 | 9,18 | -13,96 | -4,33 | -6,84 | Fe>S>Ca>B>K>Zn>Cu>Mg>Mn>N>P |
| 879 | Santa Fe | 13,58 | 19,27 | -6,99 | 6,66 | -10,58 | -7,84 | -2,29 | 11,28 | -14,17 | -3,38 | -6,23 | Fe>S>Ca>K>B>Cu>Zn>Mg>Mn>N>P |
| 880 | Santa Fe | 14,34 | 20,57 | -7,62 | 6,38 | -7,57 | -7,80 | -1,12 | 8,18 | -14,92 | -4,64 | -6,05 | Fe>Ca>K>S>B>Cu>Zn>Mg>Mn>N>P |
| 881 | Santa Fe | 13,79 | 19,45 | -6,77 | 8,03 | -8,75 | -7,94 | -4,17 | 10,48 | -13,65 | -4,77 | -6,12 | Fe>S>Ca>KCu>Zn>Mg>Mn>N>P |
| 882 | Santa Fe | -3,49 | -0,85 | 3,03 | -10,96 | -5,60 | -19,59 | -18,44 | -12,83 | 1,22 | 6,46 | 61,96 | Ca>Zn>Mn>Mg>S>N>P>Fe>K>Cu>B |
| 883 | Santa Fe | 4,52 | 10,93 | 4,86 | -4,38 | -4,23 | -9,41 | -1,92 | -9,95 | 4,73 | 17,16 | -11,82 | B>Mn>Ca>Mg>S>Zn>N>Fe>K>P>Cu |
| 884 | Córdoba | 2,09 | 10,37 | -0,89 | -1,48 | -10,14 | -5,68 | 5,45 | -17,58 | 21,16 | 9,08 | -13,08 | Mn>B>S>Ca>Mg>K>N>Zn>Cu>P>Fe |
| 885 | Córdoba | 0,59 | 1,65 | -6,55 | -6,04 | -8,45 | 4,52 | -0,77 | 2,43 | 11,20 | 4,19 | -4,49 | S>K>Mg>B>Zn>N>P>Mn>Cu>Ca>Fe |
| 886 | Córdoba | -2,29 | 2,39 | 3,34 | -5,50 | -2,98 | -1,77 | 3,81 | -7,66 | 15,56 | 9,37 | -14,30 | B>Mn>Mg>S>N>Ca>P>K>Zn>Cu>Fe |
| 887 | Bs As | -1,03 | -1,44 | 10,93 | -3,52 | -11,64 | 4,66 | 8,21 | -5,94 | 5,53 | 15,08 | -23,25 | B>S>Mn>Mg>P>N>Ca>Fe>Zn>K>Cu |
| 888 | Córdoba | 2,09 | 0,29 | 7,51 | -2,59 | -13,34 | -0,79 | 5,90 | -12,81 | 2,37 | 9,62 | -1,12 | S>Mn>Mg>B>Ca>P>N>Fe>Zn>K>Cu |
| 889 | E. Ríos | -3,15 | 7,49 | 9,68 | -2,26 | -8,84 | 4,81 | -18,73 | 0,07 | -0,77 | 10,18 | -0,42 | Zn>S>N>Mg>Fe>B>Mn>Ca>P>K>Cu |

