



**IIP**

**Boletín 20**

Fertilizando Para Altos Rendimientos

# Soja en Latinoamérica

Instituto Internacional de la Potasa  
Horgen/Suiza

2011

IIP Boletín No. 20

**Fertilizando para altos rendimientos**

# **Soja en Latinoamérica**

Dr. Ricardo Melgar  
Estación Experimental de Pergamino, Buenos Aires  
Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)  
Argentina

Dr. Godofredo Vitti  
Escuela Superior de Agricultura Luiz Queiroz  
Universidad de São Paulo, SP  
Brasil

Dr. Vinicius de Melo Benites  
Centro Nacional de Investigación de Suelos  
Río Verde, GO  
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria  
EMBRAPA, Brasil



Instituto Internacional de la Potasa  
P.O. Box 569  
CH-8810 Horgen  
Suiza

© Todos los derechos reservados: Instituto Internacional de la Potasa  
© All rights held by: International Potash Institute  
Baumgärtlistrasse 17  
CH-8810 Horgen, Switzerland  
Tel.: +41 43 810 49 22  
Fax: +41 43 810 49 25  
E-mail: [ipi@ipipotash.org](mailto:ipi@ipipotash.org)  
[www.ipipotash.org](http://www.ipipotash.org)

2011

ISBN 978-3-9523243-7-0

DOI 10.3235/978-3-9523243-7-0

Impreso en Agroeditorial, de Alejandro Matthiess, Buenos Aires, Argentina

Diseño: Ricardo Melgar, INTA, Argentina  
Martha Vacano, IIP, Suiza

# Contenidos

<b>1.</b>	<b>Importancia económica y agrícola de la soja en Latinoamérica .....</b>	<b>6</b>
1.1.	Introducción .....	6
1.2.	Importancia en el mundo.....	6
1.3.	La soja en la economía agrícola de Latinoamérica.....	7
1.4.	Cómo influye la soja en la economía de la región.....	10
1.5.	El cultivo en la rotación .....	12
1.5.1.	Intercultivo .....	14
1.6.	Una fuente de proteína y aceite .....	15
1.7.	La expansión de la soja en Latinoamérica.....	18
1.8.	Soja y biodiesel .....	21
<b>2.</b>	<b>Condiciones edáficas y climáticas apropiadas para la soja .....</b>	<b>25</b>
2.1.	Introducción .....	25
2.2.	Características del crecimiento y desarrollo de la soja.....	26
2.2.1.	Semilla y germinación.....	26
2.2.2.	Crecimiento vegetativo .....	26
2.2.3.	Desarrollo reproductivo.....	29
2.2.4.	Formación de flores y granos .....	32
2.2.5.	Madurez .....	33
2.3.	Condiciones climáticas.....	33
2.3.1.	Factores de producción.....	33
2.3.2.	Temperatura .....	34
2.3.3.	Luminosidad.....	35
2.3.4.	Duración del día y precocidad.....	36
2.3.5.	Requerimientos de agua y precipitaciones .....	38
2.4.	Suelos y rendimientos potenciales .....	40
2.4.1.	Brasil .....	41
2.4.2.	Argentina.....	44
2.4.3.	Paraguay.....	46
2.4.4.	Uruguay.....	47
2.4.5.	Bolivia.....	48
<b>3.</b>	<b>Nutrientes - Necesidades, funciones y patrones de absorción .....</b>	<b>49</b>
3.1.	Introducción .....	49
3.2.	Nitrógeno .....	49
3.3.	Fósforo .....	54
3.4.	Potasio.....	56
3.5.	Azufre.....	59

3.6.	Calcio .....	60
3.7.	Magnesio .....	63
3.8.	Micronutrientes .....	64
3.8.1.	Boro.....	64
3.8.2.	Cobalto .....	65
3.8.3.	Cobre.....	65
3.8.4.	Cloro.....	66
3.8.5.	Hierro .....	66
3.8.6.	Manganeso .....	67
3.8.7.	Molibdeno .....	69
3.8.8.	Zinc .....	70
3.9.	Patrón de absorción de nutrientes.....	70
3.10.	Absorción y exportación de nutrientes .....	72
<b>4.</b>	<b>Nutrición - Fertilización para mayor productividad y calidad .....</b>	<b>75</b>
4.1.	Fertilización y manejo del suelo en regiones de Latinoamérica .....	75
4.1.1.	Prácticas de siembra directa .....	75
4.1.2.	Cultivos de cobertura en sistemas de siembra directa .....	80
4.1.3.	Corrección de la acidez .....	83
4.1.4.	Fertilización y manejo de suelos en Brasil .....	92
4.1.5.	Fertilización y manejo de suelos en Argentina.....	103
4.1.6.	Fertilización y manejo de suelos en Paraguay.....	113
4.1.7.	Fertilización y manejo de suelos en Bolivia.....	116
4.1.8.	Fertilización y manejo de suelos en Uruguay.....	117
4.2.	Síntomas visuales de deficiencias nutricionales en soja.....	118
4.2.1.	Macro y meso nutrientes .....	119
4.2.2.	Micronutrientes .....	123
4.3.	El uso de análisis foliar .....	128
4.3.1.	Muestreo.....	128
4.3.2.	Análisis químico.....	129
4.3.3.	Interpretación de los resultados .....	129
4.4.	Fertilización con nitrógeno e inoculación .....	132
4.4.1.	Demanda de N y FBN .....	133
4.4.2.	Inoculación y reinoculación .....	133
4.4.3.	Efecto de niveles de N en el suelo.....	136
4.4.4.	Efecto de la fertilización con N.....	136
4.4.5.	Efecto de los residuos y antecesores .....	138
4.4.6.	Efecto del stress ambiental sobre la FBN.....	139
4.5.	Uso de fertilizantes más comunes .....	140
4.5.1.	Fertilizantes fosfatados.....	140
4.5.2.	Fertilizantes potásicos .....	141
4.5.3.	Fertilizantes con azufre .....	142
4.5.4.	Encalado y Fertilizante con magnesio.....	143

4.5.5.	Micronutrientes .....	144
4.6.	Fertilizantes y resistencia a enfermedades .....	144
4.7.	Fertilización foliar .....	149
<b>5.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>152</b>
<b>6.</b>	<b>Referencias citadas y recomendadas .....</b>	<b>154</b>
6.1.	Lectura recomendada .....	173
	<b>Apéndice 1: Fotografías .....</b>	<b>175</b>

# **1. Importancia económica y agrícola de la soja en Latinoamérica**

## **1.1. Introducción**

La soja es un ejemplo espectacular en materia de cadenas de valor globalizada. En el ámbito mundial es, en gran medida, el cultivo de grano oleaginoso más importante para el consumo humano y la alimentación animal. La producción y las exportaciones de soja son dominadas por EE.UU., Brasil y Argentina; también es, cada vez, más importante en Paraguay, Bolivia y Uruguay, que componen el bloque económico del Mercosur. Estos serán los países donde enfatizaremos el alcance de esta obra y de donde extraeremos los datos y referencias, dado que la producción de soja en otros países de Latinoamérica es bastante incipiente. En el ámbito mundial cuatro compañías agroalimentarias transnacionales gigantes ejercen una influencia fundamental en el comercio, molienda, provisión de insumos y producción de carnes. Estas compañías llamadas ABCD (Archer Daniel Midland, o ADM, Bunge, Cargill y Louis Dreyfus) también tienen su contraparte en los productores.

El éxito del negocio de la soja derivado del enorme crecimiento en la producción, comercio y utilización mundial, generó cambios a nivel de unidad productiva en la región del Mercosur. Los cambios, inclusive, provocaron nuevos modelos de producción, de integración comercial, de escala, superando la llamada economía de mercado y entrando de lleno en una agricultura de contratos, conformando unidades de negocios y encadenamiento de servicios que desdibujaron totalmente la figura tradicional del productor y crearon un nuevo paradigma de actor del negocio primario. La cadena de la soja se destaca sobre muchas otras cadenas productivas que componen los sistemas agrícolas y alimentarios.

## **1.2. Importancia en el mundo**

La soja pertenece a la familia de las Leguminosas (o *Fabaceae*), subfamilia Papilionoideae y género *Glycine*. La forma cultivada *Glycine max.* (L.) Merrill se utiliza tanto para consumo directo como insumo de industrias agrícolas y químicas o como combustible.

En el ámbito global es el cuarto producto entre los cereales y oleaginosos de consumo humano más importante en producción y comercio mundial (Tabla 1.1).

**Tabla 1.1.** Área cultivada, producción, consumo y exportación de los principales granos en el mundo (FAO, 2010). Datos de 2008 y de 2005 para consumo de aceite.

Cultivo	Área	Producción	Consumo humano directo	Exportación	
				Cantidad	Valor
	<i>ha x10<sup>6</sup></i>	<i>mt x10<sup>6</sup></i>	<i>mt x10<sup>6</sup></i>	<i>mt x10<sup>6</sup></i>	<i>US\$ x10<sup>6</sup></i>
Trigo	223.6	689.9	423.7	132.8	32.9
Maíz	161.0	822.7	106.4	109.7	20.8
Arroz	159.0	685.0	512.3	1.7	0.5
Soja	96.9	231.0	24.0 (*)	74.4	22.9

(\*): Sólo aceite.

Considerada a esta escala, la soja es un cultivo para procesamiento, no de consumo alimentario directo excepto por su aceite. Aun así, éste es el principal origen del aceite consumido con el 33%, siguiéndole el de palma con el 18% (FAO, 2010).

No obstante, su principal importancia deriva de su contribución de harinas proteicas a la alimentación animal. Esta industria se ha vuelto cada vez más dependiente de fuentes proteicas de origen vegetal derivada de la disminución de los stocks de harinas de pescado. Además, ha habido una fuerte presión internacional, particularmente por la Unión Europea, para prohibir el uso de harinas de carne, de huesos y residuos frigoríficos como materia prima de alimentación animal, debido a la relación entre el uso de éstas con la enfermedad espongiiforme bovina (Goldflus *et al.*, 2006).

### 1.3. La soja en la economía agrícola de Latinoamérica

La producción de soja representa una fracción muy importante en el PBI de todo el agronegocio del Mercosur, que demuestra la importancia económica para estos países. Prácticamente los países del Mercosur, conforman el 42% del total sembrado en el mundo, que se contraponen, estratégicamente con un 33% sembrado en EE.UU., satisfaciendo ambos polos la creciente demanda mundial en mutua contra estación (Tabla 1.2).



**Tabla 1.2.** Área sembrada, producción y exportación de soja y derivados en el Mercosur, EE.UU. y total mundial (FAO, 2010. Promedio 2005-2007).

País	Siembra <i>ha x 10<sup>6</sup></i>	Exportaciones			
		Producción	Grano	Harina	Aceite
		<i>mt x 10<sup>6</sup></i>			
Brasil	21.9	53.8	23.71	13.10	2.49
Argentina	15.0	42.1	9.89	23.60	5.67
Paraguay	2.1	4.5	2.91	0.80	0.19
Bolivia	0.9	1.6	0.09	1.10	0.21
Uruguay	0.3	0.6	0.00	0.41	0.00
Mercosur (*)	40.4	102.8	37.20 (54%)	38.5 (66%)	8.60 (74%)
EE.UU.	28.8	79.9	27.60	5.11	0.63
Total Mundial	92.5	217.7	69.22	58.60	11.51

(\*) Las cifras entre paréntesis indican el porcentaje de las exportaciones respecto del total mundial.

Su importancia deriva no sólo de las cifras de producción sino también del encadenamiento productivo y de servicios dentro de cada país, por el peso considerable de la agricultura y el valor de las exportaciones agrícolas en la balanza comercial de los países del Mercosur. Pero, no es uniforme para todos los países, debido a las asimetrías y ventajas competitivas y comparativas de los que componen el Mercosur. En Brasil, el peso está dado por los números totales, mientras que en Paraguay, la importancia se destaca a través de la proporción de la importancia del complejo en el total de su economía (Tabla 1.3).

**Tabla 1.3.** Importancia relativa exportaciones del complejo soja (Grano, harinas, aceite) sobre el total de exportaciones agrícolas y de manufacturas de origen agropecuario (MOA) (Banco Mundial, 2010; Promedio 2005-6).

País	Valor exportaciones MOA	Exportaciones complejo soja Total MOA	PBI corriente	Valor agregado agricultura
	<i>US\$ x 10<sup>9</sup></i>	%	<i>US\$ x 10<sup>9</sup></i>	% PBI
Brasil	9.4	7.4	975	5.5
Argentina	8.6	20.0	199	8.5
Paraguay	0.7	40.5	8	21.5
Bolivia	0.3	11.8	11	14.0
Uruguay	0.1	3.2	18	9.0

Dentro del importante contexto del complejo soja para la región y, a su vez, la importancia de la región en el mundo cuando se refiere a este cultivo, es importante destacar algunos aspectos que hacen a su industrialización e integración/coordinación de la cadena internamente.

Como principal fuente de proteína para la industria de la alimentación animal, la producción de soja ha crecido de forma tal, que la demanda total ha sido atendida satisfactoriamente. Los distintos grados de integración con las cadenas de producción de carne son muy diferentes en los distintos países, así como los consumos propios de aceite en base a su población. Nuevamente, las asimetrías fundamentan este concepto, Brasil es un gran exportador de carnes de cerdo y pollo que consumen las harinas de soja, mientras que Uruguay apenas posee una industria aceitera mínima; el primero cultiva soja desde los años sesenta y en este último país se siembra desde el 2002. Por ello, en general, la soja producida en el Mercosur es principalmente transformada *in situ* en aceite y harina y exportada a Asia y a la UE. Sin embargo, dado los grandes volúmenes, Brasil exporta 41% de su producción como grano, mientras Argentina apenas el 23% (Tabla 1.3).

En el último cuarto de siglo (1980-2005), la demanda total mundial de soja, se expandió en 174.3 millones de toneladas o 2.8 veces, en este período la tasa de crecimiento de esta demanda total de soja fue acelerándose, desde un 3% anual en los 80 a unos 5.6% anual en la última década. Si bien las tasas de crecimiento fueron algo inferiores a las de grano o de aceite de soja, el crecimiento de la demanda mundial fue acompañado por la oferta de harina de soja, que se triplicó desde 1980. La expansión de la renta, principalmente en Asia, con efecto multiplicador sobre el consumo de carnes de aves y cerdos, fue el hilo conductor de la robusta tasa de crecimiento de esa materia prima para la industria de la alimentación animal (Pinazza, 2007).

De la misma manera, el aceite considerado casi un subproducto del procesamiento del grano, creció 3.9% anual en la década del ochenta, acelerándose en los últimos años a una tasa anual de 6.7%. La necesidad de fuentes alternativas de energía tiende a impulsar el consumo de aceite de soja como combustible en el corto plazo, significando mayor participación del uso industrial en la demanda total por aceite de soja.

En general, considerando la soja en grano, EE.UU. está perdiendo participación en el mercado mundial, desde los 90 a la fecha, cediéndolo a Brasil y Argentina. En promedio perdió un 20%, pasando de un 62% (1990) a un 43% (2004). En el mismo período, Brasil aumentó su participación de 15 a 36%, en 2004. En Argentina, en cambio, se mantuvo su participación en la exportación de grano

de soja prácticamente sin cambios (11-12%), evidenciando su política de industrialización local y posterior exportación de los subproductos (Pinazza, 2007).

En términos de la concentración de las exportaciones mundiales de soja, es posible observar en los últimos cinco años, una concentración todavía más elevada de las ventas externas. En los últimos años, los principales exportadores de soja del Mercosur pasaron del 50 al 60% del total mundial. A juzgar por esta tendencia de mayores tasas de crecimiento del excedente exportable del Mercosur, no se duda en afirmar que la concentración de los exportadores tenderá a continuar en los próximos años.

Al contrario de la soja en granos, en el caso del aceite y harina de soja, Argentina fue el país que más conquistó su participación en el mercado de exportación. Aunque Argentina ya era el mayor exportador mundial de aceite de soja en 1990, con un 27% del total exportado ese año, a lo largo de los últimos años, tal participación creció en forma continua hasta alcanzar el 49% en 2004. En el caso de Brasil, aun con limitantes para aumentar la exportación de aceite y con un mayor mercado interno que el argentino, fue posible que ampliara su participación en la exportación mundial de aceite pasando de un 20 a un 30% en el mismo periodo (Pinazza, 2007).

#### **1.4. Cómo influye la soja en la economía de la región**

A pesar de las grandes diferencias macroeconómicas, la soja es un común denominador de la agricultura y el agronegocio del complejo sojero de toda la región, con la excepción quizás, de Uruguay, cuya expansión es más reciente en este país. En Brasil, el mayor productor regional de la oleaginosa, con unos 54 millones de toneladas y un potencial para destinar 100 millones de hectáreas más a las 22 millones actuales, y alcanzar los 105 millones de toneladas hacia 2020, la oleaginosa aporta ingresos por 10.000 millones de dólares en exportaciones, representando el 14% del total de productos comercializados por el país. Brasil, que vende más del 70% de su producción, acentuó en los últimos años su perfil de exportador de materia prima. Más de 9.4 millón toneladas de harina de soja se usaron, en Brasil, para producir cerca de 47 millones de toneladas de alimentos animales en 2005, esto representa más del 61% de todos los tipos de harinas usadas en los países durante este periodo. Todavía más importantes son los beneficios indirectos de su cadena, que superan en más de cinco veces ese monto. En el mercado interno brasileño, la oleaginosa mueve más de 50,000 millones de dólares, mientras que en toda su cadena ya se han generado 4.5 millones de empleos (Pinazza, 2007).

Argentina es el segundo país productor del Mercosur con 46.2 millones de toneladas en la campaña 2008. El complejo sojero que aporta la cuarta parte de las divisas obtenidas por el país en concepto de exportaciones, sumando las exportaciones de biodiesel alcanzó un valor de 13,800 millones de dólares, siendo el primer rubro generador de divisas del país. Además, contribuyó en 2007 a la recaudación fiscal en concepto de “derechos de exportación” por un valor aproximado de 4,400 millones de dólares. La integración con las cadenas de carnes, así como el consumo interno de aceite son proporcionalmente bastante menores que en Brasil, ya que el consumo interno de aceite de su gran producción es algo superior al 4% (240 mil mt). En cuanto a las harinas, la situación es similar, ya que sobre una producción total de 22 millones de mt se consumen menos del 10% (entre 1.5 y 2.5 millones) (ABIOVE, 2009).

Paraguay, el tercer país productor avanza con su integración con el Mercosur y depende de puertos marítimos en Brasil o Argentina para exportar. Su tasa de crecimiento es importante. De hecho, su integración es la economía nacional, bastante escasa. Si bien posee industria propia, la molienda local es de un 35% de su producción, equivalente a 1.35 millones de mt año<sup>-1</sup>. Pero, desde hace unos pocos años (2005), una gran proporción sale como grano, se procesa en plantas de Argentina sobre el Río Paraná y se reexportan sus derivados. No obstante, dada la escasa industrialización del país, el peso de la producción de soja y ésta dentro de la agricultura nacional es considerable (CAPECO, 2009).

En Bolivia, la soja comparte con el girasol una posición de privilegio de su complejo de aceites al igual que la Argentina. Las exportaciones del complejo soja constituyen el segundo rubro en importancia después de los hidrocarburos y en particular, las harinas son el segundo producto de exportación en importancia con 250 millones de US\$, después del gas natural. Tiene capacidad para procesar 1.5 millones de mt año<sup>-1</sup> es decir, un 90% de su producción. Su mediterraneidad es su principal desventaja comparativa y precisa de una logística importante para acceder a los puertos del Pacífico o del tráfico por la hidrovía Paraguay-Paraná. Aprovecha su integración con el otro bloque comercial regional, la Comunidad Andina de Naciones (CAN) (Perú, Ecuador y Colombia), adonde destina gran parte de las exportaciones.

Uruguay, en tanto, en los últimos cinco años pasó de sembrar 5,000 hectáreas de la oleaginosa a unas 350,000 con rindes equivalentes a los de sus vecinos. Posee una limitada industria de procesamiento con tecnología relativamente atrasada, ya que las inversiones necesarias requieren de una escala que supera las posibilidades del mercado de consumo local. La capacidad de procesamiento de oleaginosas instalada total, en Uruguay, alcanza a 450 mt día<sup>-1</sup> y procesa

principalmente girasol. (MGAP, 2009). Esta capacidad contrasta con Argentina donde son frecuentes plantas de 3,500 a 4,000 mt día<sup>-1</sup>.

Por último y más allá de las cifras y su importancia relativa, queda expresar lo que significa este cultivo en la comunidad rural de los países. Pueblos enteros, como Sorriso en Mato Grosso, Brasil o Banderas en Santiago del Estero, Argentina, han crecido y viven gracias a la soja. Tanto el comercio local de los pequeños pueblos del interior, como las industrias que fabrican maquinaria agrícola están incluidos en la cadena de valor de la soja. Finalmente, el valor agregado de todos los actores económicos vinculados con la soja y el consumo de sus familias, son el combustible fiscal para sostener el gasto público de los gobiernos municipales y nacionales de cada país.

### **1.5. El cultivo en la rotación**

La soja como cultivo de verano, es la base de la economía agrícola de vastas regiones de Sudamérica, según se demostró en los números precedentes. Su extensa área sembrada se realiza con varios escenarios geográficos diseñados para aprovechar la oferta de clima y suelos de estas regiones.

En su avance colonizador, la plasticidad del cultivo, además del fruto del esfuerzo logrado por los mejoradores y por los investigadores de la región, permitió que se ubique el cultivo dentro de variados esquemas de sucesión y secuencia de cultivos. Las operaciones permiten, en algunos casos, maximizar el rendimiento de un único cultivo anual, o bien de aprovechar la oferta de recursos de agua y radiación solar en más de un cultivo por año, adonde la soja es el cultivo central o secundario, e inclusive en inter-cultivo, donde la soja comparte, con otras especies, en el mismo espacio durante un tiempo, parte de su ciclo.

Recordando que la soja es un cultivo de verano, muy demandante de agua y de temperatura, que florece en el otoño al acortarse los días, se enumeran sucintamente algunas denominaciones que implican distintos escenarios:

**Soja de primavera.** Se siembra con bastante anticipación a la de época, en zonas sin riesgo de heladas tardías, en latitudes bajas, menores de 30° S, normalmente para permitir que el cultivo siguiente, en general maíz, pueda aprovechar el verano sin riesgos de avanzar mucho su ciclo en el otoño.

**Soja de primera o de época.** Es un único cultivo anual sembrado ya entrada la primavera en latitudes entre 20 y 40° S.

**Soja de segunda.** Es una soja que se cultiva en sucesión con trigo, normalmente algo más tarde que la de época, 1 de diciembre hasta el 10 de enero.

**Soja de zafrina.** El concepto es similar al anterior, pero se aplica más a la soja que se siembra a continuación de un cultivo de primera, bastante más tarde que la de época, del 15 de enero a fin de febrero, normalmente siguiendo a un cultivo de maíz y sin riesgos de heladas tempranas, en latitudes inferiores a 25° S.

**Soja de invierno.** Se refiere a un cultivo sembrado en bajas latitudes (menores a 20° S) principalmente en Bolivia, en contraposición a la de “verano” que es la de época.

Los cultivos que conviven naturalmente con la soja en la región son: el maíz, el trigo y el girasol y primaria y secundariamente, el algodón, el sorgo, el arroz y otros cereales de grano fino.

Cada región define su rotación alrededor de la soja eligiendo los demás cultivos según ventajas agronómicas, económicas o logísticas. Pero, en las principales regiones de producción, el maíz y el trigo constituyen los principales cultivos de grano en rotación con la soja.

Por razones económicas, muchas veces, el maíz no es un cultivo tan atractivo como la soja y por ello, en algunas regiones se tiende a hacer el monocultivo de soja. Entre otras razones es que las semillas de maíz son más caras y exigen, además, fertilizantes nitrogenados, por lo tanto la necesidad de un mayor capital para iniciar y enfrentar el cultivo demanda un mayor esfuerzo financiero al productor. De la misma manera, el trigo en bajas latitudes resulta con rendimientos marginales que no pagan, adecuadamente, el costo de producción y no constituye una opción atractiva todos los años,

Se ha enfatizado y demostrado repetidamente que la participación de gramíneas en la rotación, en particular aquellas de alto volumen de rastrojos, contribuyen positivamente no sólo al rendimiento de la soja, sino también al de la gramínea. Las razones aludidas con más frecuencia se refieren al balance de carbono, que procura ser positiva. Dado que el rastrojo de soja es muy pobre y de baja relación C/N, cuanto mayor sea la proporción de soja en la rotación, más negativo será el balance, más comprometido estará el mantenimiento de la materia orgánica en los valores originales del suelo y más se acentuará su disminución con el avance de los años de cultivo. Por el contrario, cuanto mayor sea la proporción de maíz en la rotación, mayor será el aporte de C al suelo y menor será la disminución, o inclusive, según sea el clima, puede acumularse de

materia orgánica. Como ejemplo, podemos citar un estudio mostrado en la tabla 1.4 con datos de la región sojera de Manfredi en la provincia de Córdoba (Martellotto *et al.*, 2001).

**Tabla 1.4.** Rendimiento de soja cultivada en siembra directa en monocultivo y en rotación con maíz y balance de agua de la soja. (Promedio 3 años: 1996-99).

Tratamiento	Rinde	Agua consumida (*)	Eficiencia
	<i>kg ha<sup>-1</sup></i>	<i>mm</i>	<i>kg mm<sup>-1</sup></i>
Soja continua	2,760	500	5.6
Rotación maíz/soja	3,478	477	7.4

(\*) Agua Consumida = (Agua a la siembra + lluvia) – Agua a madurez.

La mayor proporción de gramíneas en la rotación resulta en mayor porcentaje de materia orgánica y de allí, normalmente en una mayor eficiencia de uso del agua. En la localidad de Marcos Juárez, Argentina, en parcelas comerciales de producción, la media de rendimiento de un grupo de productores con una rotación 50% maíz y 50% trigo-soja, fue de 11.06 mt ha<sup>-1</sup> de maíz, 3.88 mt ha<sup>-1</sup> de trigo y 2.53 mt ha<sup>-1</sup> de soja de segunda, mientras que otro grupo, cuya rotación incluía un 33% de soja, de maíz y de trigo-soja en partes iguales, los rendimientos eran: 10.1, 3.12 y 2.53 respectivamente, asociado a un aporte de C de 5.21 y 3.77 mt ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en cada rotación (Espoturno, 2005).

### 1.5.1. Intercultivo

El intercultivo se ha ensayado con algún entusiasmo, pero aún no se lograron resultados que prometan una adopción. Esta forma de cultivo es una práctica en la que dos o más cultivos crecen en surcos de siembra separados, en una misma superficie y estación de crecimiento, superponiendo todo o parte de su ciclo. El intercultivo maíz-soja intenta aprovechar desfases temporales en los periodos críticos para la definición del rendimiento, de forma que ambos cultivos se beneficien maximizando la ocupación del área. Normalmente la suma de las fracciones de rendimiento del maíz y de la soja, es inferior a la suma de rindes individuales pero debería ser superior a cualquiera de ellos individualmente. Esto se expresa mejor con el índice “Equivalente de Uso de la Tierra” (EUT); este índice es igual a la suma de las fracciones de rendimiento de los cultivos integrantes del intercultivo relativo al rendimiento de los cultivos individuales y expresa la fracción de tierra necesaria para que con los cultivos individuales se obtengan los rendimientos combinados del intercultivo.

En Argentina se ha ensayado sembrar soja, luego de algunas semanas de la siembra de maíz, cuando este cultivo está entre V-4/5 y V-7/8. Para ello, el maíz se siembra dejando una o más líneas sin sembrar por cada una o dos de maíz sembradas, de forma de ocuparse con la soja más tarde (p. ej. 1x1(M-S-M-S), 2x2 (M-M-S-S), 3x1(M-M-M-S) o 1x3 (M-S-S-S). Los resultados, expresados como Equivalente de Uso de la Tierra (EUT), logrados en un primer año de evaluación no detectan ventajas productivas claras del intercultivo maíz-soja sobre los cultivos puros (Díaz, *et al.*, 2008).

## **1.6. Una fuente de proteína y aceite**

La soja es un cultivo único entre todos, ya que su principal contribución a la satisfacción de alimentos, a escala global, proviene de su aporte de aceite y de proteína, que componen groseramente el 22% (21.5-23.0%) y el 38% (36.5-40.0%) del peso del grano. Sin embargo, es claro que su importancia económica surge de su posición como la principal fuente de proteína para la alimentación animal. En cambio, existen numerosas alternativas para el aceite vegetal, inclusive más eficientemente productivas como la palma, según veremos en el apartado sobre biodiesel.

El grano se procesa industrialmente, en plantas de distintas escalas, adonde por presión y por tratamientos sucesivos con hexano, un solvente orgánico, se extrae el aceite, que una vez refinado es apto para consumo humano directo o es usado para el procesamiento y elaboración de distintos alimentos. El residuo resultante de la extracción es un pellet o harina, con mucha concentración de proteína (46 a 48%) que se usa para alimentación animal.

Ambos subproductos, aceite y harina son extensamente comercializados a nivel mundial, con Argentina, Brasil y el resto del Mercosur. Este, junto con EE.UU. son los grandes exportadores mundiales e India, China y la Unión Europea son los principales grandes demandantes.

### *Harinas proteicas*

La exigencia de los consumidores por carnes de animales alimentados con dietas exentas de proteínas de origen animal, valorizó la harina de soja como fuente de proteína, especialmente después de la aparición, en 1996, en el Reino Unido de una variante de la Enfermedad de Creutzfeldt-Jakob, que se relacionó con la epidemia de EEB (Encefalopatía espongiiforme bovina) en el ganado vacuno.

La composición de nutrientes de la torta de soja es variable en función del método y eficiencia de extracción de aceite, de la cantidad de retirada de



cáscara, de la composición proteica del grano de soja. La industria produce diferentes harinas, con tenores de proteína que varían entre el 44 y 48%. El de 46% el más usado en Brasil, mientras que en E.E.U.U. predomina el de 48%.

La harina de soja es la principal fuente vegetal de proteína utilizada en la composición de las dietas de animales de producción. En comparación con otras harinas de leguminosas, presenta niveles elevados de lisina, treonina y triptófano, siendo los aminoácidos sulfurados totales, metionina y cisteína, los que se encuentran en menor concentración (Tabla 1.5).

**Tabla 1.5.** Porcentajes promedios de aminoácidos en harinas proteicas de soja (Goldflus *et al.*, 2006).

Componentes de harina	46%	48%
	..... % .....	
Proteína bruta	46.7	48.0
Metionina + cisteína	2.78	2.87
Lisina	6.05	5.99
Treonina	3.83	3.87
Triptófano	1.32	1.33
Arginina	7.44	7.25
Isoleucina	4.59	4.46

### *Aceite*

La importancia de los aceites en una dieta sana es determinante. Su consumo debe ser permanente, porque transporta las vitaminas liposolubles A, D y E, además de otros nutrientes muy importantes. Los aceites están formados por grasas de distinto tipo: poli insaturadas, transaturadas y mono insaturadas. Cada uno de esos tipos de ácidos grasos tiene diferentes efectos sobre el organismo. Por otra parte, la variedad de aceites presentan distintas características para el tipo de alimento que se quiere elaborar.

El aceite de soja tiene muy bajo nivel de ácidos grasos saturados, (más de 81% de ácidos grasos insaturados) con un índice de yodo de 125-140, característica que respecto de la salud humana, lo coloca en una posición favorable respecto de otros aceites (Tabla 1.6). Es una importante fuente de ácidos grasos poli insaturados (carácter asociado a la disminución de colesterol en sangre) y de ácidos grasos mono insaturados. El aceite de soja contiene niveles medios de Vitamina E (importante en la protección contra la acción de radicales libres, poderosos agentes del envejecimiento y de la piel y la vista) en forma natural, de todos los aceites.

**Tabla 1.6.** Composición de ácidos grasos de los principales aceites comestibles (ASAGA, 2009).

Ácidos grasos	Soja	Girasol	Maní	Oliva	Palma	Maíz	Colza
Saturados (Palmitico y Esteárico), %	17	11	20	16	51	15	7
Mono insaturados (Oleico), %	19	24	40	71	39	38	57
Poli insaturados (Linoleico y Linolénico), %	64	65	40	13	10	47	36
Vitamina E, mg 100 g <sup>-1</sup>	17	70	9	12	8	33	23

Está compuesto por niveles importantes de ácido linoleico (51%) y ácido linolénico (7-8%), este último responsable de la reversión de su sabor y olor. Permanece líquido en una amplia oscilación de temperatura y puede ser hidrogenado selectivamente (disminución de linolénico a <3%). Cuando es parcialmente hidrogenado, puede ser utilizado como un aceite semisólido fluido o como una grasa. Los fosfolípidos, restos de metales, hidrocarburos y jabones, que se encuentran en el aceite crudo de soja, pueden ser removidos con facilidad para obtener un aceite refinado de mucha calidad. Las “gomas”, recuperadas en el proceso de desgomado, son fuente de la lecitina comercial (fosfolípidos de soja). La presencia de antioxidantes naturales (tocoferoles), que no son completamente eliminados en la refinación, también contribuye a su estabilidad.

Cuando se habla de aceites modificados, se refiere a aquellos que han pasado por procesos de cristalización, interestificación o hidrogenación. La hidrogenación es un tratamiento que hace pasar a los poli insaturados a mono saturados y a los mono saturados a saturados, a fin de lograr mayor durabilidad en las frituras, consistencia diferente, etc. Este proceso produce ácidos grasos trans y saturados, que son perjudiciales para el organismo humano y cuya ingesta debe limitarse.

No tiene diferenciación y no recibe la categoría de “Premium”, como los aceites de oliva o de girasol, por la gran proporción de ácido linolénico, que con la cocción genera sabores ajenos o indeseables. En Brasil y en EE.UU. se lo consume directamente, pero en Argentina su consumo es, principalmente, en mezclas con el de girasol, maní o de otros orígenes.

Además del biodiesel, que se comentará más adelante, los demás subproductos obtenibles de la cadena de la soja, son enanizados por las enormes cifras implicadas en la producción y comercio de las mencionadas presentemente. La producción de tintas, aceites terapéuticos (surfactantes), adhesivos u otros alimentos como nutracéuticos, isoflavonas, lecitina, tofu, etc., representan algunos productos industriales ,derivados de la soja, pero de mucha menor importancia con relación a las harinas, aceite y biodiesel.

### **1.7. La expansión de la soja en Latinoamérica**

La fenomenal expansión de la producción de soja en los últimos años, según mencionan las estadísticas precedentes, tanto en Brasil como en el resto de los países del Mercosur, fue el resultado de diversas fuerzas y actores. No descartando la demanda externa como el principal motor y que responde a fundamentos bastante conocidos derivados del aumento de la población mundial, nos enfocaremos en este párrafo en lo que ocurrió en la región en las dos o tres décadas pasadas. En el periodo 1980-2007, los países del Mercosur ampliaron su área sembrada con soja en unas 29 millones de hectáreas, discriminados según muestra la tabla 1.7. Esta área se expandió a partir de polos de producción establecidos en la década del setenta, en Brasil, Paraguay y Argentina, a una tasa media anual del 5% en el periodo.

La vasta mayoría de la reciente expansión de la soja ocurrió a través de la conversión de pasturas existentes prevalentes a lo largo de todo el territorio de la región, así como la apertura de nuevos paños de montes vírgenes abiertos denominados “Cerrados” en Brasil y Paraguay o montes de arbustos xerófilos, del Parque Chaqueño en Argentina, Paraguay y Bolivia. La elevada rentabilidad relativa de la soja en los últimos años y la fuerte demanda de los exportadores alimentó esta expansión. Gran parte de los beneficios logrados en las cosechas recientes fueron dirigidos a la adquisición de nuevas tierras y equipamiento, permitiendo a los productores aumentar su escala y eficiencia. La caza por nuevas tierras fue importante en regiones de tierras relativamente muy baratas, pero remotas en toda la región.

**Tabla 1.7.** Área sembrada con soja y tasas de expansión anual en países del Mercosur (FAO, 2010).

País	1970	1980	1990	2000	2007	1971-80	1981-90	1991-00	2001-07
	.....ha x 1,000.....					.....Tasa media anual % .....			
Brasil	1,319	8,774	11,487	13,640	20,638	12	3	4	5
Argentina	26	2,030	4,962	8,638	16,100	29	9	6	6
Paraguay	28	475	900	1,176	2,308	21	8	7	8
Bolivia	1	38	143	580	960	30	15	9	7
Uruguay	1	40	29	12	462	24	-2	0	27

El primer factor que surge como respuesta a esta expansión, es la existencia y disponibilidad de vastas regiones de suelos con aptitud agrícola, potencialmente productivos. A diferencia de EE.UU., Europa o Asia, con muchísimo menos potencial de expansión, pero similar en potencial a África. Los números de la Tabla 1.8 (FAO, 2010) expresan el potencial de expansión de tierras en cada país, no considerando siquiera la conversión de tierras forestales y sólo las áreas bajo pasturas permanentes o destinadas a la ganadería extensiva.

**Tabla 1.8.** Superficie de tierras de uso agropecuario y forestal en países del Mercosur. (FAO, 2010).

País	Tierras total	Uso agropecuario y forestal	Tierra arable
	..... ha 10 <sup>6</sup> .....		
Brasil	845.9	263.6	59.0
Argentina	273.7	129.4	28.5
Paraguay	39.7	24.3	4.2
Bolivia	108.4	37.8	3.1
Uruguay	17.5	15.0	1.4

*Nota:* Área Agrícola incluye: pasturas, cultivos perennes y forestaciones, según definición y códigos de FAO. Tierras arables incluye: aquella área cubierta por cultivos y pasturas temporarios anuales.

Un segundo plano del análisis tiene que ver con el segundo factor de productividad: el capital disponible, necesario para el desarrollo de las tierras y para convertir las tierras vírgenes, sean bosques tropicales, subhúmedos, templados o semiáridos o sabanas y sus denominaciones locales: Cerrado, bosque chaqueño o espinillar, en tierras aptas para una agricultura mecanizada.

Realizar las obras de infraestructura necesarias, caminos, alambrados y frecuentemente la fertilización y encalado, precisa de capital de riesgo. Muchas veces se convierten tierras ganaderas en agrícolas, precisándose también eliminar arbustos, levantar corrales y alambrados para convertirla en un área apta para la agricultura mecanizada. En algunos suelos, el capital necesario para corregir los problemas de acidez y fertilidad fosfatada puede representar valores superiores al valor de la tierra misma.

Dicho capital disponible, debe descansar en una estructura de instituciones bancarias y financieras de distinto volumen y calidad en cada país. Más aún, esta estructura, articulada en sistemas de contratos, con bajos costos de

transacción son los que han favorecido la expansión en algunos países, acelerándolo o haciéndolo más lento en aquellos adonde dichos costos son mayores y por consecuencia el costo del capital es más elevado.

Sin duda también que la infraestructura, caminos, puertos y su nivel de desarrollo es un factor importante para la expansión de la frontera agropecuaria dentro de un país, pero si bien no se ignora, se asume que la infraestructura en las fronteras de expansión de la agricultura son por comparación pobres en relación a las aéreas más desarrolladas dentro del mismo país.

Finalmente es un factor de consideración, la movilidad del capital y de los recursos dentro del área del Mercosur. En definitiva, el recurso humano. Este ha evolucionado de tal manera, que no podemos considerar como paradigma al productor tradicional que cultiva su tierra y es dueño del capital de trabajo, de las maquinarias y que vende su producto en la puerta de su establecimiento. El actor principal de esta expansión agrícola en Sudamérica es sí, el productor, pero organizado en sociedades especializadas en captar el capital externo, formar asociaciones y cadenas de contratos entre proveedores de servicios, propietarios de tierras, dueños de maquinarias, sustentadas por principios de calidad crediticia.

La conjunción de estos tres factores: tierra disponible con climas y suelos aptos, capital prestable en estructuras financieras confiables ,con bajos costos de transacción, y productores con capacidad de organización y escalamiento, que les da movilidad dentro y fuera de sus países, fueron los responsables de escuchar el llamado de la demanda.

## **1.8. Soja y biodiesel**

La soja y otros cultivos oleaginosos, como la colza y la palma principalmente, ocupan un lugar central en el reciente debate sobre biocombustibles (o agro combustibles) y alimentos. Originado a raíz de la eventual proximidad del agotamiento de los combustibles fósiles (*Peak oil*) o con la finalidad de aumentar la oferta y satisfacer la creciente demanda de energía mundial, los países centrales iniciaron programas de corte de los combustibles convencionales fósiles con crecientes proporciones de etanol y biodiesel. Dado que la oferta de tierras es limitada e insuficiente para atender la demanda de alimentos de la ascendente población mundial, además de la discutida escasa eficiencia entre el balance de energía resultante de la producción de los cultivos y el agro combustible producido, son innumerables las voces en contra de estas iniciativas.

Se cuestiona entre otros temas de impacto ambiental y efectos colaterales derivados, la baja eficiencia de producción por unidad de superficie, ya que cultivos como la Palma aceitera (*Elaeis guineensis* L.), son mucho más eficientes o la Jatrofa (*Jatropha curcas* L. y otras sp.), que crece nativa a la vera de los caminos y no restaría tierras con capacidad para la producción de alimentos. Esta planta es promovida en Paraguay como fuente de biodiesel de alto rendimiento, con rindes de 1.5 a 2 mt ha<sup>-1</sup>. En el mundo se la cultiva en zonas tropicales y subtropicales, (Filipinas, Mali e India); es resistente a la sequía y puede intercalarse con otros cultivos de renta como café, caña de azúcar, frutales y otros. El rendimiento típico, en litros de biodiesel por hectárea, de algunos cultivos que pueden usarse como materia prima para fabricar biodiesel es:

- Palma: 4,826 l ha<sup>-1</sup>
- Coco: 2,185 l ha<sup>-1</sup>
- Colza: 969 l ha<sup>-1</sup>
- Maní: 855 l ha<sup>-1</sup>
- Girasol: 779 l ha<sup>-1</sup>
- Soja: 532 l ha<sup>-1</sup>

Fuente: Brown, 2006.

En cambio, se argumenta a favor que: la soja se cultiva principalmente para la producción de harinas proteicas, como insumo de la producción de carnes y que el aceite es un exceso, usado como mero elemento para cocinar; por cada mt extra de aceite que se producen, se agregan 4 mt de harina de soja.

A pesar del debate, sin embargo, los principales actores económicos, así como la capacidad tecnológica del mundo han puesto presupuestos y energía para el avance de esta tecnología, así como enormes inversiones para el desarrollo de plantas de producción de biodiesel y etanol.

El biodiesel consiste en esteres mono alquílicos de ácidos grasos de cadena larga y corta, producidos a partir de aceites vegetales o animales o grasas, nuevas o usadas. El biodiesel de soja es un combustible alternativo sintético, fabricado a partir del aceite de soja por un proceso químico denominado transesterificación, adonde la glicerina se separa del aceite, que se transforma en metil éster, el nombre químico del biodiesel. Puede mezclarse con diesel de petróleo y usarse en los motores casi sin modificación; su contenido de energía es de alrededor del 90% del diesel de petróleo.

Dado lo reciente del debate y las ventajas, comparativas y competitivas, de cada país, la posición de cada uno de los integrantes del Mercosur, ante la oportunidad de ampliar la generosa oferta de aceite, es diferente. Brasil y

Paraguay han privilegiado la producción de etanol, mientras que Argentina, con menor proporción de caña de azúcar y con una cartera energética diferente, ha privilegiado las inversiones en plantas de biodiesel. No obstante, debido al peso considerable de las economías en la región, la producción de biodiesel de Brasil y Argentina es la que cuenta. Por otra parte, a pesar de los incentivos fiscales para la producción de biodiesel, a partir de aceite de ricino o de palma, el aceite de soja, seguido por el de algodón en Brasil y por el de girasol en Argentina, son las opciones más viables para la producción a gran escala, dada la infraestructura corriente y los volúmenes de producción. Se estima que, actualmente, la soja representa más del 90% de la materia prima usada en la producción de biodiesel en el Mercosur.

En Brasil, la legislación actual obliga a las petroleras a comercializar un 2% de biodiesel en el gasoil mineral y en 2013, la mezcla requerida aumentará a 5% (B5). En Argentina en cambio, no hay obligación actual y se estipula un corte obligatorio de 5% para el 2010. Estos requerimientos en relación a la demanda y a la estructura de energía de estos países, indican el potencial exportador de Argentina, ya que la demanda de Brasil obligará a su consumo total con escasos saldos exportables (a diferencia del etanol). En cambio, satisfacer la demanda impuesta por el B5 desde el 2010, implicaría algo más de 600 mil mt para un consumo interno estimado en 12 millones de mt de gasoil.

La información más actualizada de la Agencia Nacional de petróleo indica que Brasil tiene 36 plantas autorizadas para producir biodiesel, con una capacidad industrial estimada de 2.98 millones de mt año<sup>-1</sup>, casi el doble de lo requerido para B2; si bien algunas plantas aún están en construcción, existen muchas más en proyectos. Argentina cuenta con la industria aceitera de mayor escala del mundo. Muchas plantas tienen capacidad de procesar varios miles de mt día<sup>-1</sup>. De los 40 millones de toneladas de soja que se producen en este país, casi 30 millones son molidos para ser exportados como harina y aceite. Casi todas las grandes empresas aceiteras están incrementando su capacidad de procesamiento, a tal punto que se estima que hará falta soja de Paraguay, Bolivia y del sur de Brasil para que no quede capacidad ociosa.

La Asociación Argentina de Biocombustibles e Hidrógeno (AABH) indica que la capacidad industrial instalada llega a los 1.6 millones de mt año<sup>-1</sup> y contando las varias plantas próximas a inaugurarse, la producción podría alcanzar los 2 millones de mt año<sup>-1</sup> de biodiesel antes de 2010 (ASAGA, 2009). La tabla 1.9 muestra la producción local de biodiesel, adonde debe notarse que Brasil consumió íntegramente su producción y Argentina, la exportó en su totalidad.



**Tabla 1.9.** Biodiesel. Producción de Brasil y exportaciones de Argentina (MAGyP, 2010; ABIOVE, 2009).

Año	Argentina	Brasil
	..... $10^3$ mt .....	
2006	0.3	0.7
2007	316	155
2008	1,070	730

Considerando la magnitud de las inversiones en marcha, así como la tendencia de los países de la Unión Europea y EE.UU. sobre la búsqueda de opciones alternativas a los combustibles fósiles, es muy probable que la producción de biodiesel aumente sustancialmente en los próximos años. Dada la preponderancia de la soja, entre otros importantes cultivos oleaginosos del mundo, es indudable que ocupará un rol central en la satisfacción de la demanda de biodiesel, ensanchando el área cultivada en los países del Mercosur.

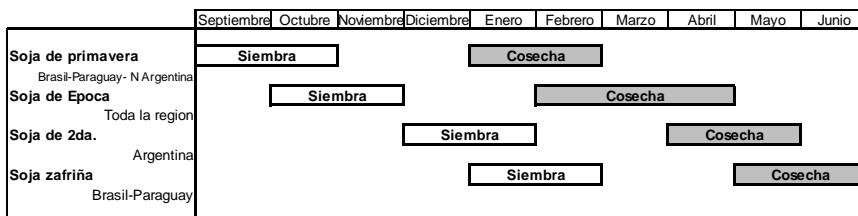
## 2. Condiciones edáficas y climáticas apropiadas para la soja

### 2.1. Introducción

La soja (*Glycine max*, L. Merr) posee una extensa distribución geográfica y se desenvuelve en un amplio rango de altitudes, difundiéndose en ambientes desde el ecuador, en el Estado de Amazonas en Brasil, hasta la latitud 45° o superiores, como en Ontario, Canadá, localidad que equivale en el hemisferio sur a Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina. Sin embargo, el cultivo económico está acotado en Sudamérica alrededor de polos de producción definidos de Brasil, Argentina, Paraguay, Uruguay y Bolivia, con pequeñas áreas en expansión en los llanos de Colombia y de Ecuador.

El mejoramiento genético produjo adaptaciones de la soja a amplias condiciones ambientales, sean climáticas como edáficas. Esta labor de los genetistas ha logrado la expansión del área cultivada a regiones antes impensadas, gracias al aumento de la tolerancia a estreses ambientales, principalmente hídricos y de extrema acidez. El mejoramiento genético también ha influido en la superación del rendimiento alcanzable, mejorando eficientemente el uso del agua y los nutrientes y permitiendo obtener más kilos de grano por kg de nitrógeno o mm de agua disponible.

Además, gracias a la plasticidad de la soja y las investigaciones agronómicas en sistemas de cultivos, se ha logrado la adaptación a sistemas de cultivo continuos y de intersembra, donde se procura superar las limitaciones de oferta ambiental por una mayor ocupación efectiva de la superficie de cultivo, lográndose más de un cultivo por año calendario dadas las limitaciones para lograr mayores rendimientos por unidad de área. La figura 2.1 muestra un diagrama con los rangos de fechas de siembra y cosecha para la soja, según algunos sistemas de cultivo descriptos en el capítulo anterior (1.5).



**Fig. 2.1.** Diagrama con los rangos de fechas de siembra y cosecha de la soja sembrada en distintos sistemas de cultivo.

## 2.2. Características del crecimiento y desarrollo de la soja

El desarrollo de la soja implica distintas fases de crecimiento, simplícidamente los periodos vegetativo y reproductivo, que poseen diferencias en sensibilidad a la temperatura, al fotoperiodo (o duración del día), al déficit hídrico y al estrés de N. Se han descrito hasta trece fases, cada una teniendo un distintivo indicador acumulativo que comienza en un punto de partida anterior de estadio de cultivo, (Ritchie *et al.*, 1997).

### 2.2.1. Semilla y germinación

La semilla de soja es un embrión protegido por un tegumento. El embrión, que constituye el 92 al 94% del peso de la semilla, está compuesto por dos cotiledones y un eje embrionario (epicótilo, hipocótilo y radícula). El tegumento es de constitución variable, pero, en general, es muy permeable y susceptible de sufrir daños mecánicos y climáticos, así como de ser afectado por enfermedades (Casini *et al.*, 1997).

La germinación comienza cuando la semilla absorbe agua del suelo hasta un 50% de humedad. El primer signo externo de la germinación es la emergencia de la radícula (raíz primaria) que crece hacia abajo y ancla la planta al suelo. Luego, enseguida, comienza el crecimiento del hipocótilo (sección del tallo encima de la radícula) hacia arriba empujando los cotiledones (hojas seminales). Una vez fuera del suelo, se enderezan el hipocótilo, se desenrollan los cotiledones y el ápice de crecimiento queda expuesto a la luz. La emergencia normalmente ocurre entre 4 a 15 días después de la siembra, dependiendo de la humedad y temperatura del suelo, así como la profundidad de siembra.

Para la germinación, el contenido en agua del suelo no debe exceder el 85% o caer por debajo del 50% de agua disponible del suelo. Después del establecimiento, el cultivo puede soportar períodos cortos de sequía.

### 2.2.2. Crecimiento vegetativo

Los estadios que describen el crecimiento se denotan con un número, indicando el número de hojas desarrolladas. Las dos primeras hojas, que aparecen enfrentadas en el primer nudo encima de los cotiledones, son unifoliadas. Las hojas subsecuentes son trifoliadas y ocurren en lados alternados a lo largo del tallo, siendo la primera que aparece, la que denota el estadio V1, y continúa hasta 20 a 25 hojas trifolios. La tasa de aparición de hojas tiene una temperatura mínima de 7°C y aumenta hasta los 30°C (Hesketh *et al.*, 1973).

Normalmente, las hojas que se forman primero son más pequeñas que las posteriores. Cuando la planta tiene entre 2 y 3 hojas trifolios, los nódulos indicadores de la infestación con Rhizobios y vitales para la fijación del N, son ya visibles en las raíces.

Por definición, la hoja desarrollada es aquella que tiene encima otra hoja, aún pequeña, pero con bordes de folíolos que ya no se tocan. Luego de la tercera hoja desarrollada (V3), se definen los nudos arriba de la hoja unifoliada, desaparecen los cotiledones y aparecen las yemas axilares, puntos de crecimiento secundarios, que permiten la recuperación de las plantas ante posibles daños por defoliación.

Es importante notar que el desarrollo de las fases vegetativas ocurre, simultáneamente, con las fases del periodo reproductivo de emisión de flores y vainas, deteniéndose la formación de hojas con el inicio del llenado de granos o R5. Este es el periodo que define el rendimiento, al establecer el volumen de biomasa y órgano fotosintético, último captador de la energía solar que sintetizará carbohidratos, proteínas y aceites en el grano, sostenido apropiadamente por un sistema radicular que, a su vez, es sustento del órgano fijador de nitrógeno que alimentará a la planta para formar las proteínas.

La dependencia de la tasa de formación de nudos a la temperatura (progresión del estadio “V”) se ilustra en la figura 2.2. Esta función de temperatura es importante, durante el crecimiento vegetativo temprano, ya que la tasa de desarrollo de hojas limita.

La temperatura influye en esta etapa, no sólo en el efecto primario sobre la tasa fotosintética y la velocidad de formación de hojas, sino indirectamente a través de la velocidad de crecimiento del área foliar y cobertura del suelo por la canopia. La temperatura también influye en el alargamiento relativo de los entrenudos y el área foliar individual. La disminución de la velocidad de crecimiento foliar es particularmente notable con temperatura debajo de los 20°C, ya que todas las funciones actúan juntas: disminución del progreso de los estadios “V”, entrenudos más cortos, menor área foliar individual, menor tasa fotosintética y de fijación nitrogenada.

En épocas normales de siembra, se desarrollan entre 5 y 8 hojas antes del comienzo de la floración. Una gran parte de las variedades comerciales son indeterminadas y desarrollan hojas nuevas, que continúan creciendo después que la floración ha comenzado en los nudos inferiores. En estas sojas indeterminadas, la planta tendrá algunas vainas con semillas en desarrollo mientras se siguen produciendo flores.

## *Raíces*

El sistema radicular consta esencialmente de una raíz principal, pivotante, un importante número de raíces secundarias que se ramifican profusamente y raíces adventicias muy ramificadas que salen de la base del hipocótilo.

En el estadio V2, las raíces laterales proliferan rápidamente en los primeros 15 cm de suelo y en V5 ya cubren el surco; hay un claro paralelo entre el desarrollo de la canopia y la extensión en área sobre el terreno que cubre el sistema radicular. Estas raíces además de crecer hacia abajo, lo hacen superficialmente.

Dependiendo de la disponibilidad de agua del suelo, el desarrollo inicial de las raíces en suelos profundos es relativamente rápido y vigoroso. En suelos sin impedimentos se han registrado profundidades de hasta 2.3 m en Haplustol de Manfredi, Córdoba (Dardanelli et al., 1991). A mayor longitud del ciclo, las raíces penetran a profundidades mayores. Pero, normalmente, el sistema radicular puede extenderse hasta 1.5 m. El cultivo extrae con eficacia toda el agua disponible del suelo hasta 1.8 m. Si la profundidad del suelo está restringida por alguna barrera física (panes endurecidos) o químicas (acidez por exceso de aluminio intercambiable), disminuye la penetración radicular en profundidad, extendiéndose lateralmente.

Si bien el cultivo puede prosperar bien en suelos pesados, las raíces tienden a no penetrar incluso ante capas moderadamente densificadas. Aunque las raíces se concentren, en general, en los primeros 0.6 m o aún, a veces, en los primeros 0.3 m, una cantidad considerable de agua puede extraerse de las capas más profundas por debajo de la zona radicular, particularmente durante los períodos finales del crecimiento. Sin embargo, bajo condiciones normales, el 100% de la absorción de agua ocurre en los primeras capas del suelo, desde la superficie hasta los 0.6 o hasta 1.3 m de profundidad. Ante condiciones de sequía sin embargo, la soja no se adapta tan bien como otras especies, por ej. El garbanzo o el poroto.

La mayor parte del crecimiento rápido de las raíces se observa, en general, después del comienzo del periodo reproductivo. En R1, las tasas de crecimiento de las raíces aumentan activamente y se mantienen hasta los estadios R4 y R5, mientras las raíces secundarias se concentran en los primeros 25 cm superficiales; en ese volumen se concentra la mayor parte del peso seco del sistema radicular y nodular.

En general, la capacidad de exploración del sistema radicular está estrechamente relacionada con la densidad del suelo, el estado nutricional de la planta y el largo del ciclo del cultivar (Andriani *et al.*, 1991).

### *Sistema radicular bajo siembra directa*

Dado la extensa adopción del sistema de siembra directa en la agricultura en Sudamérica y en particular en soja, es interesante evaluar el efecto del sistema de labranza sobre la performance del sistema radicular.

Dado su sistema pivotante, la raíz principal soja es sensible a la presencia de panes compactados, torciéndose. Algunos tipos de suelos, en particular, bajo manejo inadecuado, (p. ej.: tráfico de maquinaria pesada en condiciones de mucha humedad) desarrollan panes de compactación, con densificación de los horizontes superficiales que pueden, eventualmente, conducir a cambios en la distribución de las raíces, aunque no en su desarrollo (Beutler *et al.*, 2007). Dicha situación es, en particular, más sensible en algunos tipos de suelos (Kubota *et al.*, 2005).

Con respecto al efecto bien documentado de estratificación de nutrientes aportados por la fertilización en siembra directa como el K y el P, se ha demostrado que esta estratificación afecta el crecimiento de las raíces, pero no el rendimiento de soja (Fernández, 2006). El crecimiento radicular bajo siembra directa fue más afectado por la disponibilidad de K y menos por el arreglo espacial o la densidad. Comparando los sistemas radiculares de soja de 1ra. y de 2da., siguiente a trigo, esta última produjo relativamente más raíces que la soja de 1ra. (Coale y Grove, 1990).

### 2.2.3. Desarrollo reproductivo

En los cereales, la transición desde el desarrollo vegetativo al reproductivo es distintiva, mientras que en soja y en otros cultivos que muestran un hábito indeterminado, el desarrollo reproductivo y vegetativo co-existen en alguna proporción del ciclo del cultivo. Nuevas inflorescencias aparecen en los meristemas axilares de la soja, mientras que aparecen nuevos nudos con trifolios en el meristemas apical. En los genotipos determinados y semideterminados, el meristema apical eventualmente se vuelve un racimo, finalizando así la actividad vegetativa en el ápice del tallo. En los tipos indeterminados, esta transición es menos abrupta y es influida por la competencia por asimilatos entre los granos en crecimiento sobre los nudos existentes.

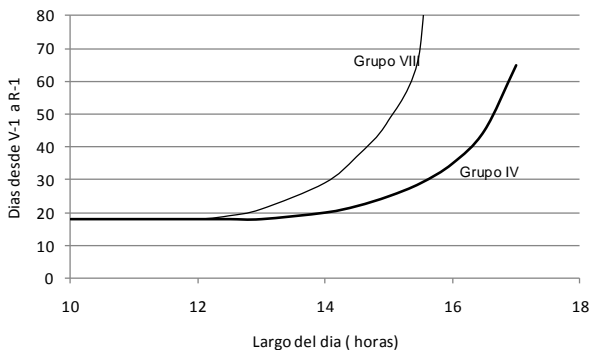
Los dos factores abióticos dominantes que influyen en la fenología de la soja son la temperatura y el fotoperiodo (Cregan y Hartwig, 1984, Hesketh *et al.*,

1973 y Summerfield y Wilcox, 1978). La temperatura, en general tiene su influencia sobre la velocidad de desarrollo del cultivo. En cambio el fotoperiodo modifica la respuesta de la soja a la temperatura, ya que como planta de día corto, los días más largos decrecen la velocidad de desarrollo. Los estreses hídricos y de nutrientes pueden influir en la velocidad de desarrollo de la soja (Brevedan y Egli, 2003, Brevedan *et al.*, 1978, Sinclair y deWit, 1975 y Sinclair y deWit, 1976).

### Ciclos de madurez

La clasificación de los grupos de madurez de los cultivares de soja más difundidas en zonas templadas como la Argentina o EE.UU. están basados en la respuesta del desarrollo al fotoperiodo (Heatherly y Elmore, 2004). Esta clasificación divide a los cultivares en grupos de madurez, comenzando con el grupo más tolerante a las bajas temperaturas (000) y casi indiferente al fotoperiodo, luego se ubican las que poseen mayores requerimientos de días cortos, (00, 0, I, II, etc.) hasta el grupo X o diez, siguiendo la numeración en números romanos.

Cada grupo de madurez está adaptado a un rango de latitudes de alrededor de 200 km en la zona templada, lo que resulta que si se siembra a una latitud más alta (más al S, en el hemisferio sur) el fotoperiodo que encontrará será más largo, favoreciendo el desarrollo vegetativo y atrasando la floración. Por el contrario, llevarlo a latitudes más bajas lo expondrá a fotoperiodos más cortos que anticiparán la inducción floral, dando como resultado plantas de menor tamaño. Esta sensibilidad determina la restricción de la siembra en determinadas épocas para una misma latitud, así como también dificulta su adaptación a fajas más amplias de latitud (Fig. 2.2).



**Fig. 2.2.** Efecto del largo del día sobre la inducción a la floración de variedades de soja de dos grupos de madurez (Jones *et al.*, 1989).

Además de la respuesta fotoperiódica, la soja está caracterizada por una fase de desarrollo a la que se le da el nombre de periodo juvenil. La característica del largo de ese periodo o “juvenilidad”, o fase inicial del crecimiento vegetativo, durante la cual la planta no florece aun con características inductivas, es manejable por el mejoramiento genético. Hasta que ésta fase no se complete, no se induce la floración, aun cuando la planta prospere en días cortos, por debajo del mínimo crítico de la variedad. Al final del periodo juvenil, la planta responde a las variaciones de largo del día. Así, con un largo periodo juvenil, a la planta le lleva más tiempo alcanzar la madurez fisiológica, (Kiihl y García, 1989).

Este fue un esfuerzo de enfoque, destinado a manejar esta característica heredable, lo que dio lugar al mejoramiento que llevó a la soja a colonizar áreas tropicales de bajas latitudes. Así se identificaron y desarrollaron, recientemente, genotipos con periodo juvenil más largo y ciclos más precoces (Spehar *et al.*, 1993). Estos genotipos, que pertenecen a los grupos VIII, IX y X, de acuerdo con la clasificación de grupos de madurez templados, poseen floración tardía en condiciones de días cortos. Se clasifican en precoces con hasta 120 días de ciclo, intermedios, entre 120 y 130 días, y tardíos, entre 130 y 145 días. Estos ciclos se subdividen a su vez en semiprecoces y semitardíos para un rango intermedio de días.

Al comparar cultivares para un mismo grupo de maduración, una soja con periodo juvenil corto es más productiva. Sin embargo, su mayor potencial se aprovecha en periodos de siembra más bien estrechos y con suelos de buena fertilidad. Por el contrario, los cultivares con largo periodo juvenil son más productivos porque permiten siembras durante un periodo más largo, extendiendo su fase vegetativa y generando buena altura y biomasa en siembras tempranas. Por lo tanto, un periodo juvenil largo tuvo y continúa teniendo un papel importante en la ocupación de los Cerrados con el cultivo de soja, adonde áreas bajo cultivo son extensas, los suelos no siempre son fértiles y con frecuencia, la siembra se atrasa por lluvias irregulares.

Cada cultivar tiene una duración fotoperiódica crítica, por debajo de la cual el periodo vegetativo no aumenta su duración. Ante periodos de luz más largos (días o fotoperiodos más largos), la velocidad de desarrollo de los órganos reproductivos se hace más lenta y la floración se retrasa. Por el contrario, ante fotoperiodos más cortos la floración se acelera. Los distintos genotipos tienen un amplio rango de sensibilidad al fotoperiodo, desde aquellos insensibles, a otros con fotoperiodos críticos altos, adaptados a latitudes altas que florecen con fotoperiodos muy largos y otros genotipos adaptados a bajas latitudes, que florecen con fotoperiodos muy cortos y con mucha sensibilidad fotoperiódica.



#### 2.2.4. Formación de flores y granos

La floración se acciona, principalmente, por la duración del día y la temperatura. Las sojas de grupos de madurez muy tempranos son casi insensibles al fotoperiodo y el desencadenamiento de la floración es controlado, en especial, por la acumulación de unidades de calor. Con variedades de grupos de madurez más largos, la duración del día llega a ser cada vez más importante, y el número de unidades de calor requeridas desde la emergencia a la floración, disminuye a medida que el día se acorta. Ésta es la razón por la que las sojas plantadas tardíamente toman menos días para madurar que las siembras tempranas.

En las axilas de las hojas se forman los racimos florales entre 2 y más de 30 pimpollos. Este periodo de floraciones se extiende entre 20 y 35 días. Los cultivares indeterminados presentan inflorescencias más grandes en los nudos inferiores del tallo, disminuyendo hacia la parte apical y las ramificaciones. Por el contrario, en los cultivares determinados el tamaño de los racimos aumenta hacia la zona apical de la planta. Gran parte de los pimpollos abortan, ya sea como flores o vainas pequeñas, en un número estimado entre el 20 y el 80%, en cualquier momento de su desarrollo sin que esto afecte el rendimiento. En un año normal se estima que entre el 50 y el 80% de las flores no llegan a producir vainas y cerca del 50% de ellas quedan vanas, es decir no producen granos.

El crecimiento de la semilla de soja tiene su óptimo entre 21.0°C y 23.5°C basados en datos de Egli y Wardlaw (1980), la masa final y su tasa de crecimiento declina cuando la temperatura excede los 23°C. La adición de vainas es similar pero con límites más extremos, ya que la soja no forma vainas con temperaturas nocturnas menores de 14°C o medias diarias menores de 18°C (Thomas y Raper, 1978).

Los granos dentro de los vainas, no comienzan a crecer hasta que la vaina se ha desarrollado completamente en longitud. El periodo de llenado de la semilla es crítico para la determinación del rinde final. Los estreses hídricos o de N, pueden afectar la madurez de la semilla, su tamaño y el número de semillas por vaina y número de vainas.

#### *La acumulación de la materia seca*

La producción de biomasa por parte de los órganos fotosintéticos se acumula siguiendo la clásica curva sigmoidea, adonde la primera parte de la acumulación es lenta, se hace máxima durante el periodo vegetativo, a partir del comienzo de la floración durante el establecimiento de las vainas, y más lenta durante el crecimiento de las semillas o llenado de granos. Este periodo de máxima velocidad de crecimiento dura entre 20 y 40 días, según el cultivar y fecha de

siembra, luego decrece durante la etapa final de crecimiento de las semillas y se detiene poco después. Durante este periodo el cultivo puede crecer entre 80 y 200 kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup> de materia seca.

Esta etapa de máximo crecimiento se realiza con todas las estructuras vegetativas: hojas, tallos pecíolos y raíces; luego comienza la partición de la biomasa producida, al comienzo del estadio de formación de vainas (R3). Durante el crecimiento vegetativo, la partición entre hojas, tallos y raíces depende de la progresión del desarrollo vegetativo, del déficit hídrico y del déficit de N. A medida que progresa el desarrollo reproductivo, se forman nuevos “destinos” (vainas, semillas) y los asimilatos (“fuente”) son crecientemente distribuidos o “particionados”, repartiéndolos a estos tejidos antes que a los órganos vegetativos. Así, la demanda del “destino” reproductivo consiste en muchos tejidos reproductivos individuales, todos de edades diferentes y cada uno teniendo una demanda genética potencial por asimilatos limitada por la temperatura.

#### 2.2.5. Madurez

Al acercarse el otoño y acortarse los días, la planta madura, las hojas mueren y caen desde abajo hacia arriba de la planta. Con esta declinación, en tasa fotosintética y de fijación de N, la semilla continúa creciendo y movilizand o nutrientes de otras partes de la planta. Las semillas alcanzan su máximo peso seco y son fisiológicamente maduras, cuando su contenido de humedad está entre 40 y 45%. Luego de la madurez fisiológica, es sólo una cuestión de secado para permitir la cosecha y trilla.

Dado que en la planta coexisten semillas en distinto estadio de madurez y no todas las vainas se desarrollan al mismo tiempo, la madurez del cultivo se alcanza cuando las semillas tienen entre un 50 y un 55% de humedad. Al llegar a este estadio, la semilla se independiza fisiológicamente de la planta y comienza su vida como organismo independiente. En ese momento se alcanza el máximo vigor y poder de germinación, mientras que el contenido de humedad baja desde 50% hasta que alcanza un valor óptimo para la cosecha y conservación, alrededor del 14%.

### 2.3. Condiciones climáticas

#### 2.3.1. Factores de producción

La expresión fenotípica de una planta depende de la interacción de su carga genética con el ambiente. De estos dos grandes factores de producción, genético

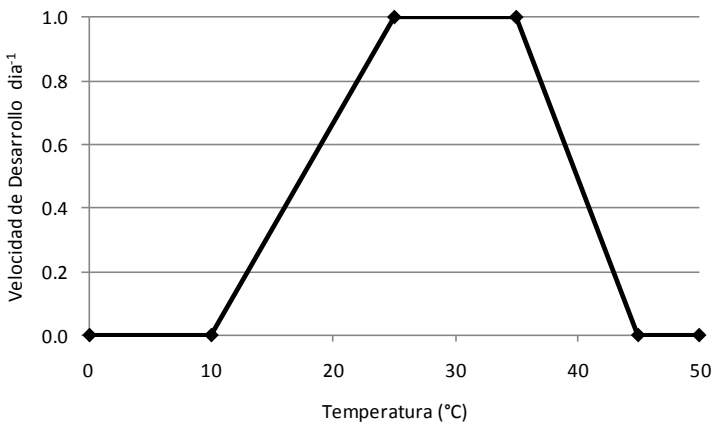
y ambiental, el primero tiene en general una pequeña influencia en la variación del potencial de producción, al contrario del segundo, ya que éste, comúnmente, es el factor más limitante para que la planta exprese todo su potencial de crecimiento.

Los factores de producción relacionados al ambiente son climáticos (radiación solar, temperatura y humedad), edáficos (físico y químico) y biológicos (organismos de toda naturaleza). Además de estos factores que dependen de la naturaleza, algunos son parcialmente controlados por el hombre, a través del riego, la nutrición de las plantas y el control de plagas y enfermedades

### 2.3.2. Temperatura

La soja se cultiva bajo climas cálidos en zonas tropicales, subtropicales y templadas y en estos dos últimos, durante la primavera y el verano. La soja es relativamente resistente a temperaturas bajas y altas, pero las tasas de crecimiento disminuyen mucho por encima de 35°C y por debajo de los 18°C. En algunas variedades, la floración se puede retrasar con temperaturas por debajo de 24°C. Las temperaturas mínimas medias para el crecimiento deben superar los 10°C y para la producción económica por encima de 15°C.

Los procesos vegetativos que son sensibles a la temperatura incluyen la velocidad de germinación y emergencia, de la aparición de hojas y nudos, duración del crecimiento vegetativo, área foliar específica, fotosíntesis y respiración de mantenimiento. El desarrollo de cada fase está limitada por temperaturas cardinales o límites de desarrollo: base, óptima, óptima 2da., más alta y máxima. Así, por ejemplo, la velocidad de aparición de las hojas durante el desarrollo vegetativo tiene un límite inicial de 10°C, la velocidad de esta aparición aumenta hasta un máximo de 25°C, la que se mantiene hasta los 35°C y luego decrece hasta anularse por encima de 45°C (Fig. 2.3).



**Fig. 2.3.** Esquema de temperaturas cardinales asociadas a la velocidad de aparición de las hojas de soja.

Los distintos procesos fisiológicos, incluyendo germinación, emergencia, expansión del área foliar y la fotosíntesis, tienen sus límites de desenvolvimiento dentro de este rango de temperaturas (Jones *et al.*, 1989).

### 2.3.3. Luminosidad

Dada la dependencia de la producción de biomasa a la tasa fotosintética, con adecuada disponibilidad de agua y nutrientes, la capacidad de acumular biomasa está en función de la intercepción máxima de área foliar durante los periodos de máxima heliofanía. Esta combinación de factores óptimos, en latitudes más altas, es función directa de la sincronización de la fecha de siembra del cultivar de ciclo adecuado con el momento del año de mayor duración del día, el solsticio de verano, de modo que coincida con el periodo de llenado de granos.

Sin embargo, debido a que el efecto de la radiación solar es acumulativo y la soja es de floración continua e indeterminada, dicha radiación tiene un efecto relativo menor en la expresión del rendimiento y en particular en fechas de siembra tempranas. La variación relativa del largo del periodo vegetativo y reproductivo compensa, mediante la removilización de carbohidratos y proteínas, la eventual intensidad lumínica baja. En latitudes más bajas, adonde hay menor variación de largo del día, el efecto es entendiblemente menor.

#### 2.3.4. Duración del día y precocidad

La soja florece cuando la duración de los días se acorta, característica del otoño en zonas templadas. A pesar de que la temperatura ejerce una considerable influencia en la floración de la soja y en la interacción con el fotoperiodo, éste es el factor de mayor expresión.

La respuesta al fotoperiodo se modifica con la variedad y la temperatura; las variedades actuales se han desarrollado con una adaptación a estrechas diferencias de latitud. El largo del día influye en la velocidad de desarrollo del cultivo; en los tipos de día corto, los días largos retardan la floración, lográndose plantas más altas y con más nudos. Al acortarse los días cortos se acelera la floración, en especial para las variedades de maduración tardía. El crecimiento vegetativo cesa normalmente durante la formación de la producción. La longitud del período de crecimiento total es de 100 a 130 días o más.

#### *Fecha de siembra*

La fecha de siembra interacciona significativamente con el ciclo de la variedad, determinando respuestas al crecimiento y desarrollo. A su vez, esta interacción determina tanto una diferente sincronización entre la máxima área foliar (intercepción de luz solar) y la oferta ambiental de luz y agua. Así también esta interacción determina la coincidencia de eventos clave como la germinación, floración y cosecha, con condiciones climáticas extremas, por ejemplo: heladas tempranas y tardías, sequías cortas de verano (o “veranitos”) o periodos de lluvias torrenciales. Por esta razón, la elección de la fecha de siembra y de ésta en relación a un cultivar de un ciclo determinado, es el principal factor de manejo que condiciona los rendimientos.

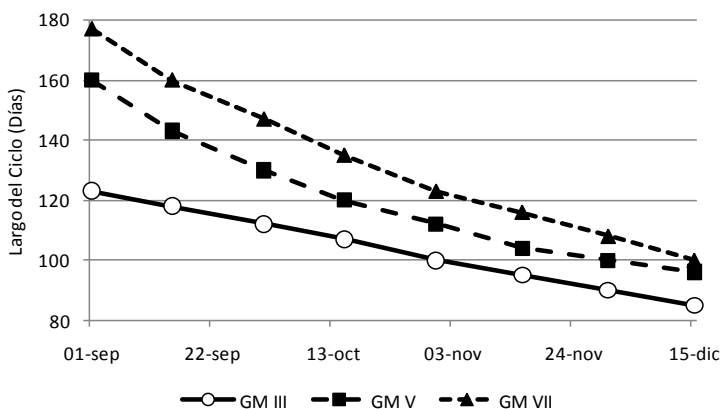
En general y considerando sólo al régimen térmico, de sur a norte, en latitudes templadas la fecha de siembra se adelanta desde diciembre a septiembre y el ciclo se alarga desde los grupos 00 hasta el X (Fig. 2.4). En cambio, en latitudes más bajas, del trópico, se buscan sincronizar los periodos críticos con los periodos de mayor probabilidad de precipitaciones.

A pesar de la variabilidad en los regímenes climáticos de América del Sur adonde se cultiva la soja, las lluvias caen concentradas en el periodo estival, entre septiembre-octubre y marzo-abril. Por eso, muchas veces las siembras más tempranas pueden realizarse al comienzo de la estación de lluvias. Por otra parte, en algunas regiones se procura evitar el periodo lluvioso de otoño, que coincide con el fin de ciclo del cultivo y así afectar la expresión de enfermedades o la facilidad de la cosecha.

Sembrados en distintas fechas, los cultivares del mismo ciclo modifican la duración de su desarrollo, así como su estructura de cultivo. En las zonas templadas, el atraso de la siembra resulta en un acortamiento del periodo vegetativo, que es más pronunciado cuanto más largo es el ciclo del cultivar o mayor el grupo de madurez y como, normalmente, se acortan los entrenudos, se afecta la tendencia al vuelco, el hábito de crecimiento, su altura y comportamiento frente a enfermedades y plagas.

También, como regla general, los cultivares más precoces con menor duración del periodo vegetativo, disponen de menor tiempo para la acumulación de biomasa y son más sensibles a irregularidades de tipo edafo-climático. Por esta razón, la elección de estos cultivares requiere de mayor calidad de ambientes para expresar su potencial de rinde. De otra manera, estreses climáticos o bióticos que afecten su desarrollo vegetativo o reproductivo tendrán impacto en el rendimiento, sin posibilidad que pueda compensar con más nudos, ramas y floraciones la pérdida de rendimiento, debido a la limitada extensión de su ciclo de cultivo.

Como los genotipos responden diferencialmente al ambiente, la mejor época debe determinarse por evaluaciones de comportamiento en ensayos regionales conducidos durante un cierto número de años. Dada la necesidad de optimizar el ciclo del cultivar elegido con la fecha de siembra, cobra importancia además, la elección de una óptima densidad de siembra y espaciamento de los surcos, que adecuen la arquitectura de la canopia a la expresión del desarrollo del cultivar y al manejo de las operaciones de cultivo.



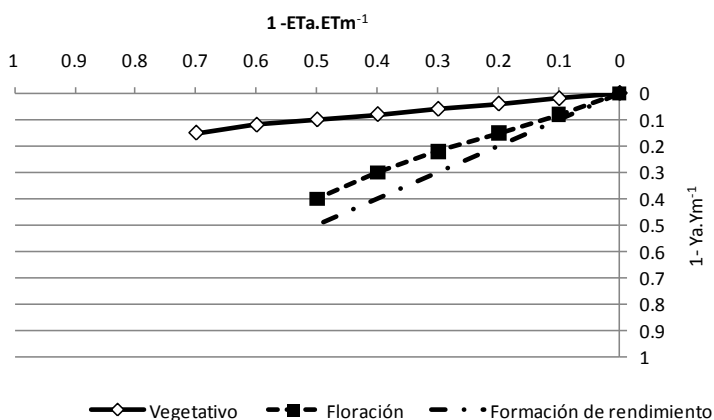
**Fig. 2.4.** Efecto de la fecha de siembra sobre el largo del ciclo de distintos grupos de maduración (GM) de soja a la latitud de 30° S (Baigorri, 1997).

### 2.3.5. Requerimientos de agua y precipitaciones

El requerimiento de agua (ETm) para una máxima producción, varía entre 450 y 700 mm durante el ciclo, según el clima y la longitud del período de crecimiento (Smith, 1990). El rendimiento de soja aumenta con precipitaciones crecientes, volviéndose asintótico por encima de los 700 mm. En Argentina, el límite oeste de la producción de soja se evidencia a lo largo de la isohieta de 750 mm anuales.

Estos requerimientos están definidos en el coeficiente de cultivo (kc) con referencia a una evapotranspiración de referencia (ETo). Los coeficientes kc para los distintos periodos son: Etapa inicial: 0.3-0.4 (20 a 25 días, V-0 a V-4); Desarrollo vegetativo: 0.7-0.8 (25 a 35 días, V6-R1); Desarrollo reproductivo inicial: 1.0-1.15 (45 a 65 días, R1-R5), Llenado de granos: 0.7-0.8 (20 a 30 días, R5-R6) y Comienzo madurez a cosecha: 0.4-0.5 (R7-R8), (Smith, 1990).

El gráfico de la Fig. 2.5 representa la sensibilidad del rendimiento ( $Y$   $Y_o^{-1}$ ) al estrés hídrico durante las etapas de cultivo de la soja. La figura muestra la relaciones entre la disminución relativa de rendimiento ( $1 - Y_a Y_m^{-1}$ ) y el déficit hídrico relativo de evapotranspiración ( $1 - E_a E_T m^{-1}$ ) para los periodos fenológicos de crecimiento: vegetativo, floración y llenado de granos (formación del rendimiento).



**Fig. 2.5.** Efecto del stress hídrico sobre el rendimiento de grano de soja en distintos periodos de crecimiento (adaptado de Smith, 1990).

Para una óptima producción, agua suficiente debe estar disponible a la siembra para la germinación, equivalente al 15 y el 50% de la capacidad de retención hídrica del suelo. La deficiencia del agua durante el período vegetativo retardará el crecimiento. Los períodos del crecimiento más sensibles a los déficits hídricos son durante la floración y el periodo que sigue a la formación del rendimiento, particularmente al final del período de floración e inicio del período de desarrollo de la vainas, momentos en que los déficits hídricos pueden provocar una abundante caída de flores y vainas.

La resistencia a la sequía aparente de algunos cultivares reclamada durante la floración y desarrollo de vainas, es el resultado de un largo período de floración que se extiende por más de un mes; leves déficits hídricos durante una parte de este período pueden compensarse por una mayor retención de flores y por ajustes al formar más vainas, más tarde. Para el llenado normal de vainas y lograr mayores rendimientos, el agua del suelo durante el período de formación del rinde, no debe ser menor que el 50% del nivel de agotamiento del agua del perfil de suelo.

Los procesos sensibles al déficit hídrico incluyen la fotosíntesis, transpiración, fijación de N, disminución del área foliar (vía disminución del área foliar específica), progreso de los estadios vegetativos, elongación de entrenudos y partición de fotosintatos a las raíces. Cuando la absorción de agua, por las raíces, no satisface la demanda de la transpiración por el follaje, la fotosíntesis y transpiración se reducen proporcionalmente. Además, disminuye el desarrollo y el avance de los estadios vegetativos, el área foliar específica, la elongación de entrenudos y la partición a las raíces, siendo procesos más sensibles que la fotosíntesis al suministro de agua.

El proceso de fijación de N es además muy sensible, consiguiendo por medio de un mecanismo regulador, que la planta desprenda sus nódulos al disminuir el agua disponible en el suelo, evitando mantener estructuras “caras” en fotosintatos. Se estimula la senescencia si el déficit continúa por varios días.

Al principio, se evapora una mayor proporción del agua recibida por lluvias, por una menor cobertura del suelo. A medida que aumenta el agua disponible por lluvias, la evaporación del suelo se vuelve una fracción menor de la evapotranspiración, dado que se produce una canopia mayor, que ensombrece el suelo y una mayor proporción del agua usada va a la transpiración.

La planta es sensible al encharcamiento temporario, inclusive una napa fluctuante cercana a la superficie, puede afectar de forma negativa el rendimiento. Por otra parte es moderadamente tolerante a la salinidad del suelo. La disminución de la producción debido a la salinidad del suelo es: nula con



conductividad eléctrica (CE) en el extracto de suelo menor a 5 mmhos  $\text{cm}^{-1}$ , el 10% con CE de 5.55 mmhos  $\text{cm}^{-1}$ , el 25% con CE de 6.25 mmhos  $\text{cm}^{-1}$ , el 50% con CE de 7.55 mmhos  $\text{cm}^{-1}$  y del 100% con más de 10 mmhos  $\text{cm}^{-1}$  de CE.

### *Riego*

Normalmente, la soja no se produce bajo riego, sin embargo, según algunas condiciones climáticas, uno o más riegos suplementarios durante los períodos críticos de crecimiento, pueden aumentar substancialmente el rendimiento. Para la programación de un sistema bajo riego, en condiciones de evaporación medias (5 a 6 mm  $\text{día}^{-1}$  de ETm), puede asumirse un nivel de agotamiento de 55% del agua del suelo. Si fuera posible un riego, la mejor sincronización debería ser durante el último período de floración, cuando las vainas pequeñas están comenzando a aparecer. De ser factible dos riegos, uno debería incluirse al comienzo del periodo vegetativo para asegurarse un rápido establecimiento de la canopia. Un tercer riego, si fuera posible, dará el mejor resultado si se aporta al principio del llenado de semillas.

## **2.4. Suelos y rendimientos potenciales**

La soja se cultiva en una gran variedad de suelos y bajo numerosos climas de regiones tanto tropicales como templadas, con distintas fechas de siembra y en diferentes sistemas de uno, dos o más cultivos por año.

Bajo tales variantes, es lógico que a veces el máximo rendimiento potencial sea sacrificado en aras de cubrir el suelo con una determinada rotación. Es decir, en lugar de lograr un único cultivo anual que rinda 4  $\text{mt ha}^{-1}$ , se prefiera sembrar la soja, luego de cosechar el trigo, con un potencial de rinde de 3  $\text{mt ha}^{-1}$  o menos, como es común en una de 4 hectáreas sembradas en Argentina. De la misma manera en Brasil y Paraguay, una proporción similar del área sembrada con soja es rotada con maíz, que sucede a la soja, conformando dos cultivos al año.

También vale mencionar que como cultivo anual, su área de cultivo es variable y sujeta al oportunismo de los productores, que ante mejoras de precios de los mercados, a veces se siembran en suelos de bajo potencial, con limitaciones de productividad por factores no corregibles de suelo o clima, pero donde el mayor riesgo de producción se compensa con la posibilidad de obtener una rentabilidad adecuada y sostenida por un buen precio.

Otra situación es que el área potencialmente apta no se cultiva por otras razones. El mapa de esta área muestra el contraste de la zona densamente cultivada en el este de Paraguay y centro-oeste de Brasil, con la ausencia de cultivo en el

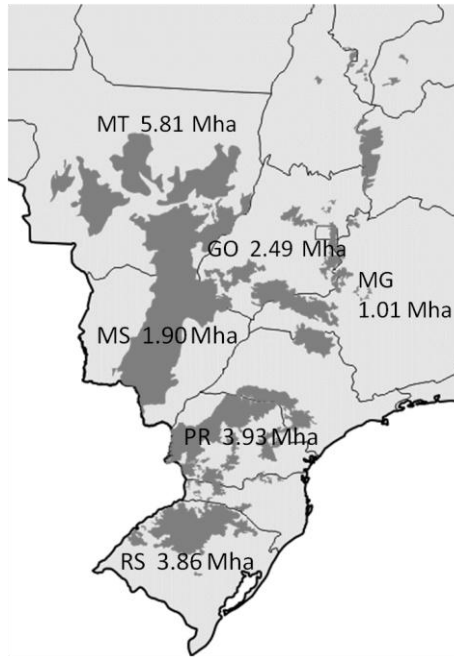
extremo noroeste de Argentina, en la provincia de Misiones. Mientras que éste y los estados de Santa Catarina en Brasil, o el Departamento de Alto Paraná en Paraguay, poseen suelos de similar aptitud para la producción de soja, en Misiones, Argentina, el área se ha destinado a la producción forestal, sin vocación, ni infraestructura para la producción de granos.

En la misma línea, cuando en 2001 productores argentinos literalmente “invadieron” el oeste de Uruguay para sembrar soja, aprovechando una coyuntura económica favorable, aprovecharon tierras destinadas a la ganadería. Otras áreas de Sudamérica hoy poseen tierras aptas con alto potencial para el cultivo y de hecho son mencionadas, con frecuencia, como una importante reserva para la expansión agrícola. No obstante, una buena proporción de estas tierras están en biomas ecológicamente frágiles o bien cubiertas por florestas, bosques o montes, tanto xerófilos como húmedos y su entrada en producción agrícola está regulada o protegida por leyes locales de distinta condición de preservación.

#### 2.4.1. Brasil

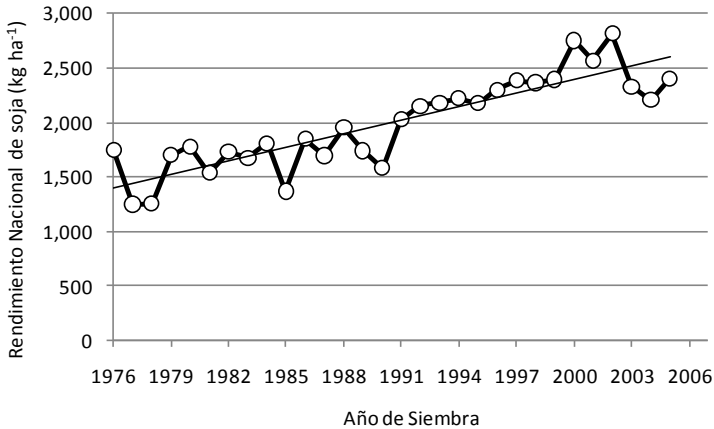
Brasil es el país con mayor área sembrada de soja en Latinoamérica y segundo del mundo con 22 millones de ha sembradas (CONAB, 2009). La producción se concentra en dos regiones que producen cerca del 40% del total, cada una. La tradicional, en el sur y la de expansión en el centro-oeste, (Fig. 2.6).

Tanto la producción como el rendimiento promedio nacional han crecido progresivamente desde la década del setenta (Fig. 2.7). El aumento ha sido muy rápido en los estados de la región de centro-oeste (Mato Grosso, MT, Mato Grosso do Sul, MS y Goiás, GO) en el área conocida como de Cerrados. Por otra parte, en el área tradicional de siembra de soja en el sur, (Paraná, PR, Rio Grande do Sul, RS y Santa Catarina, SC) han conservado los rendimientos y el área de siembra prácticamente sin cambios desde sus inicios en la década del setenta. Los estados del sureste (São Paulo, SP, Espírito Santo, ES), norte (Roraima, RO, Amazonas AM) y nordeste (Tocantins, TO, Bahia, BA) producen, en conjunto, apenas entre el 14 y 16% del total, mientras que los primeros continúan su expansión y producen alrededor del 40% cada uno (Fig. 2.6).



**Fig. 2.6.** Área sembrada de soja por municipio en los principales estados de Brasil. Las cifras en cada Estado son millones de ha, (CONAB, 2009).

Los suelos son diferentes en las dos principales regiones, pero en su mayoría son suelos tropicales con arcillas de baja actividad (caolinitas, óxidos de Fe y Al), lo que les confiere baja fertilidad natural, pero buenas condiciones físicas. La baja fertilidad nativa de estos suelos, principalmente bajos niveles de fósforo y potasio, hace que la demanda de la agricultura en estos suelos convierta a Brasil en uno de los principales mercados del mundo de fertilizantes. De acuerdo con el sistema de clasificación de suelos de Brasil, (EMBRAPA, 1999), en las tierras agrícolas del sur prevalecen los nitosoles como la *Terra Roxa estruturada* (12 contra 1%) (Ultisoles) suelos originados de basalto con buena saturación de bases, mientras que en el centro-oeste dominan los Latossoles (Oxisoles 52 contra 25%), suelos con muy baja saturación de bases y a menudo con severos problemas de acidez por aluminio (Coelho *et al.*, 2002).



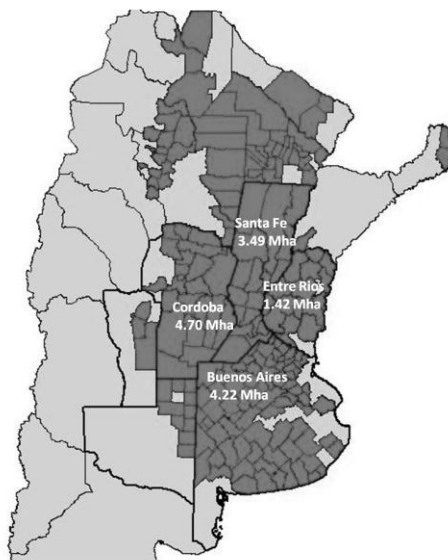
**Fig. 2.7.** Serie histórica de rendimientos en Brasil (CONAB, 2009).

Los rendimientos de soja promedio nacionales están en el orden de los 2.7  $\text{mt ha}^{-1}$  y a nivel de parcela con buen manejo, no difieren entre las distintas regiones, alrededor de 2.5 a 4.0  $\text{mt ha}^{-1}$ , los que son, sin duda, menores que los obtenidos en Argentina, siendo mejor los logrados en los suelos más fértiles y más arcillosos, que oscilan entre 3.5 y 4.0  $\text{mt ha}^{-1}$ , mientras que en los suelos más arenosos y con problemas de acidez o fertilidad pueden esperarse valores entre 2.2 y 3.0  $\text{mt ha}^{-1}$ .

Los rendimientos de soja en Brasil crecieron cerca del 58%, pasando de un promedio de 1.65  $\text{mt ha}^{-1}$  de las décadas del setenta y ochenta a 2.60  $\text{mt ha}^{-1}$  en la última década. Parte de ese aumento de rendimiento puede atribuirse al incremento tecnológico observado, en especial, en la región de los Cerrados, siendo parte de esos avances relacionados al uso de fertilizantes. Se observa un aumento promedio casi lineal de rendimiento de cerca de 50  $\text{kg ha}^{-1}$  año desde la campaña 1991/92, cuando se alcanzó el rinde promedio de 2.0  $\text{mt ha}^{-1}$ , siendo esa tendencia interrumpida, temporariamente, en las campañas 2003 a 2006 como consecuencia de la llegada de la roya asiática de la soja (*ferrugem*), una enfermedad fúngica provocada por una bacteria (*Phakopsora pachyrizi*) en las principales áreas productoras del país. En la campaña 2008/2009 se observó una reducción en el rinde promedio, en función de algunos problemas climáticos en el sur, pero principalmente por la reducción en el uso de fertilizantes, en particular, en los suelos con fertilidad aún en construcción, en las áreas de expansión de la soja en la región nordeste (Fig. 2.6).

## 2.4.2. Argentina

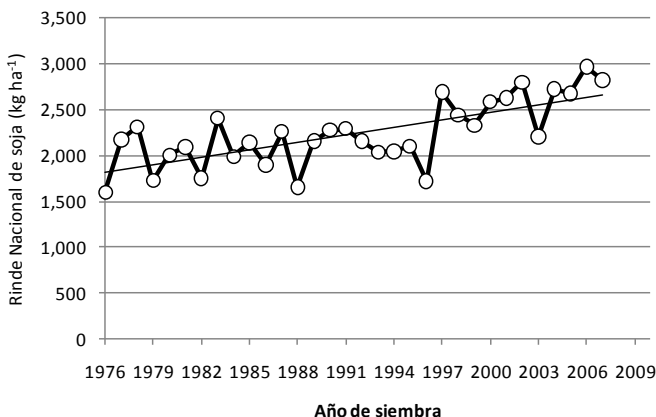
Prácticamente la totalidad de la producción de soja de Argentina está en la región pampeana norte, cubriendo el sur de la provincia de Santa Fe, norte de Buenos Aires, este de Córdoba y oeste de Entre Ríos (Fig. 2.8), restando alrededor del 15% mayoritariamente en las provincias del noroeste. Según el sistema de clasificación de suelos *Soil Taxonomy* (Soil Survey Staff, 2010), los suelos en la región pampeana son Argiudoles y Hapludoles, en el este, y Argiustoles y Haplustoles, hacia el oeste. Es decir, son suelos profundos desarrollados bajo loess, limosos, medianamente ricos en materia orgánica y saturados de bases, sin problemas de acidez. El horizonte superficial es franco o más fino y puede estar sobre un horizonte argílico más pesado, a una profundidad de 20 a 40 cm o estar ausente directamente (Moscatelli y Puentes, 1998).



**Fig. 2.8.** Área sembrada de soja en Argentina. Las cifras en cada provincia son millones de ha (MAGyP, 2010).

La capacidad de uso o productividad de los suelos es variable, así como la erosión y degradación sufrida en distintas subregiones. Sin embargo, con buen manejo, los concursos de rendimientos de productores normalmente superan los  $6.0 \text{ mt ha}^{-1}$  todos los años. Se espera que los buenos lotes de soja de primera, bajo rotación con maíz, rindan entre  $3.8$  y  $4.2 \text{ mt ha}^{-1}$ , mientras que los de soja de segunda, después del trigo rindan entre  $2.8$  y  $3.5 \text{ mt ha}^{-1}$ . Los rendimientos a

nivel de departamento o partido, oscilan entre 2.5 y 3.5 mt ha<sup>-1</sup> para la soja de primera y entre 2.0 y 2.4 mt ha<sup>-1</sup> para los de soja de segunda. En los últimos años se ha verificado un aumento sostenido de los rendimientos a escala nacional, atribuido principalmente a avances tecnológicos incluso al uso de inoculantes, al avance genético, al mejor control de malezas (uso de variedades RG) y por supuesto al mayor uso de fertilizantes, que desde su ausencia en 1995 pasó a un uso promedio de 100-120 kg ha<sup>-1</sup> de fertilizantes en las últimas campañas (Fig. 2.9).



**Fig. 2.9.** Evolución de los rendimientos nacionales de soja en Argentina (MAGyP, 2010).

Como describiremos en las prácticas de fertilización, la historia agrícola de estos suelos, los primeros adonde se realizó la agricultura en Argentina a principios del siglo XX, hizo que se produjera un deterioro continuo y constante de la fertilidad, medida por la pérdida de la materia orgánica y cationes, así como otros nutrientes, fósforo y azufre, ligados a aquella. Este proceso se agudizó notablemente en los últimos dos décadas. Por esta razón, si bien por muchos años se cultivó soja sin fertilización, esta se ha adoptado como práctica corriente en casi un 70% del área, levantando sistemáticamente los rindes a nivel de país desde los últimos años. Sin embargo, la mineralogía del material de origen hace que los suelos sean muy ricos en potasio, previniendo la fertilización con este elemento. En varios ensayos realizados con potasio, no se han registrado respuestas a este nutriente, aunque sí a aquellos nutrientes acompañantes, que lo contienen en el producto fertilizante, como azufre (S) o cloro (Cl).

En los últimos años, la expansión del cultivo se realizó fuera de la región pampeana, adonde comenzó con fuerza en la década del setenta. El área de mayor tasa de difusión del cultivo fue en el noroeste, en las provincias de Santiago del Estero, Chaco, Tucumán y Salta, que pasó de 380 mil ha en el trienio 1995-97 a 1.53 millones de ha, diez años después (2005-07). Los suelos de estas regiones son muy fértiles en P y cationes, aunque no en materia orgánica. Las mayores limitaciones de estas regiones son las lluvias más irregulares durante la época estival, lo que no le resta potencial productivo pero sí, estabilidad a la producción.

### 2.4.3. Paraguay

En Paraguay, casi la totalidad del área bajo cultivo se realiza en la región oriental, adonde cuatro departamentos cubren más del 80% del área sembrada de soja (Fig. 2.10). El área agrícola de la región oriental dominada por Ultisoles y en menor predominancia con Alfisoles y Oxisoles. Son suelos rojos con variada productividad, muy profundos, con arcillas de baja actividad, algunos con problemas de acidez y baja fertilidad como resultado de texturas arenosas (Derpsch, 2001).



**Fig. 2.10.** Área sembrada de soja en Paraguay. Las cifras en cada departamento son millones de hectáreas (IICA, 2009).

Según la variabilidad de texturas, que van desde arenosa hasta arcillosa, la dotación de nutrientes es variable. Asimismo, todos precisan de aplicaciones regulares de fósforo y potasio debido a la pobreza intrínseca del material de origen en fósforo. Muchos suelos del este se han originado a partir de basaltos, lo que resulta en suelos medianamente saturados de bases, magnesio en particular. Sin embargo, la importante pluviosidad de la región lixivia los suelos y hace preciso la fertilización regular con potasio.

En estos suelos, la productividad potencial es superior a las 4.5 mt ha<sup>-1</sup>, sin embargo, la mayoría de la región practica dos o más cultivos por año en una secuencia que puede ser trigo-soja, en mayo y octubre, o soja-maíz, en octubre y febrero, sembrados respectivamente. Los rendimientos departamentales oscilan entre 1.6 y 2.8 mt ha<sup>-1</sup> y en los buenos lotes se esperan no menos de 3.6 mt ha<sup>-1</sup>.

Muchos suelos tienen problemas de acidez, con elevados niveles de aluminio (Al<sup>3+</sup>) intercambiable que provocan pH inferiores a 5.5. La aplicación de encalado, con materiales calcícos o dolomíticos, es una necesidad para la producción económica de soja. Esta práctica es conocida y adoptada, registrándose distinta necesidad de material, según sea la textura del suelo y el nivel de acidez a corregir.

En la década de los ochenta la tasa de deforestación fue muy alta, pero en la actualidad el estado paraguayo controla el uso del suelo para actividades agropecuarias, no permitiendo el desmonte adonde el bosque es la vegetación natural. No obstante existen miles de hectáreas desmontadas con suelos aptos para agricultura mecanizada extensiva, actualmente bajo uso ganadero, que podrían entrar en producción de soja sin restricciones, en la medida que los propietarios se comprometan a reforestar un 25% de la superficie del predio.

#### 2.4.4. Uruguay

En Uruguay, el área cultivada con soja no superaba las 20 mil ha hasta el año 2000, luego creció exponencialmente y en pocos años alcanzo más de 350 mil ha. Los suelos usados en agricultura están dispersos en todo el territorio nacional, aunque concentrados en las tierras de mejor aptitud agrícola del Uruguay, en el litoral oeste en los departamentos de Paysandú, Río Negro, Soriano, Colonia y Flores. La soja se siembra en suelos Argiudoles, más pesados que los similares de Argentina arcillo-limosos, con suaves pendientes y muy pobres en P y limitaciones por rocosidad. Los suelos tienen mayor riesgo de erosión como consecuencia de una topografía con pendientes promedio del 4% y la presencia de horizontes arcillosos que limitan la infiltración.



Anteriormente hubo dos infructuosos impulsos para ampliar la frontera de agricultura de granos en los años ochenta y noventa, pero tan pronto los precios no fueron estimulantes el cultivo desapareció como consecuencia de la importante incidencia de plagas y limitaciones a la capacidad de almacenaje de agua de los suelos. Estos factores explican que la productividad no llegue a los valores promedios de países de la región. Pero, también es posible que esas menores escalas de productividad sean consecuencia de la falta de ajustes tecnológicos a las condiciones locales en el proceso acelerado de expansión. Sin embargo, el crecimiento de los rendimientos por adopción de tecnología es similar al resto de la región, lo que abre un horizonte de competitividad posible de mejorar.

La soja se cultiva sobre una variabilidad de ambientes edáficos y una gran parte del área se desarrolla sobre suelos con limitada capacidad de almacenaje de agua. La intensificación agrícola hacia sistemas de agricultura continua en siembra directa, sólo será viable con mucha mayor participación de los cereales en las rotaciones. Para crecer el área de siembra de cultivo, deberá hacerlo sobre suelos de cierta marginalidad o desplazando otros cultivos de la rotación y en ambos casos, se desafía la sostenibilidad productiva. Sólo ciertas zonas del noreste del país presentan suelos de importante potencial agrícola actualmente en uso ganadero, aunque se localizan a mayores distancias a puerto.

#### 2.4.5. Bolivia

En Bolivia, la producción de soja se concentra principalmente en Santa Cruz de la Sierra, el principal departamento agrícola al sudoeste del país. Hay dos épocas de cultivo, siembras entre octubre a diciembre, que es la más importante y comprende el 70% del total y el resto, sembrado en invierno entre mayo y julio. La productividad es más baja que en otras regiones de América del sur y la media nacional oscila entre 1.9 y 2.2 mt ha<sup>-1</sup>. Sin embargo, en parcelas bien conducidas con buen manejo es posible lograr rendimientos superiores a 3.6 mt ha<sup>-1</sup>.

En el sur y este del Departamento de Santa Cruz predominan suelos aluviales de buena fertilidad natural, relativamente pobres en materia orgánica, neutros a levemente alcalinos, franco limosos, uniformes y con suficientes lluvias en primavera-verano. En el norte, los suelos son de menor calidad, irregulares sobre antiguos cauces fluviales, de moderada fertilidad natural, más ácidos y con mayor régimen de lluvias; en esta región es posible realizar dos cosechas al año en gran parte debido a napas muy cerca de la superficie y a la muy baja probabilidad de heladas invernales.

### **3. Nutrientes - Necesidades, funciones y patrones de absorción**

#### **3.1. Introducción**

Las plantas en general y la soja en particular, están constituidas principalmente por agua, que alcanza hasta el 95% de su peso, dependiendo de la especie, edad y disponibilidad de agua. Aproximadamente el 90% de la materia seca de la planta está constituida por carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O). La fuente inagotable de carbono y oxígeno es el aire, de donde son fijados a través de la fotosíntesis formando compuestos orgánicos. El hidrógeno tiene como fuente al agua presente en el suelo, absorbida por el sistema radicular. Al contrario del aire, la disponibilidad de agua es limitante, pudiendo ocurrir déficits que limitan el crecimiento.

La composición mineral de las plantas, alrededor del 5 a 6% de la materia seca, es variable y se acepta como normal dentro de límites denominados: nivel crítico inferior y nivel crítico superior. Cualquier elemento químico presente en el suelo puede ser absorbido por la planta. Sin embargo, sólo trece elementos inorgánicos son considerados esenciales en el sentido de precisarse para completar el ciclo vital, poseer funciones específicas y no poder ser reemplazables por otro elemento. Estos son: nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), molibdeno (Mo) y zinc (Zn). Otros elementos pueden ser esenciales para otras especies en procesos específicos, por ejemplo, el sodio (Na) necesario por las halófilas y el cobalto (Co) precisado por las leguminosas; en particular para la participación del proceso de simbiosis.

Debido a la amplitud en el rango de concentración de nutrientes, estos fueron clasificados en macronutrientes o nutrientes primarios, nutrientes secundarios y micronutrientes. Entre los primeros se mencionan al N, P, K entre los secundarios al Ca, al Mg y al S y dentro de los micronutrientes: al B, Cl, Fe, Mn, Mo y Zn. A pesar de esa separación, todos tienen la misma importancia fisiológica, aun cuando la diferencia entre la menor y mayor concentración de nutrientes pueda llegar a una relación de 1:450,000.

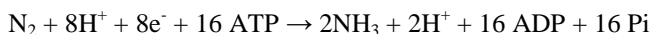
#### **3.2. Nitrógeno**

Por su importancia económica, el gran interés del aporte de proteínas a la población y a la economía mundial de la soja, requiere ingentes cantidades de N, que, gracias a la fijación biológica, son mayormente suplidas por esta. Los cálculos que asignan un valor equivalente en fertilizantes a las producciones

nacionales de Brasil, Argentina y el resto del MERCOSUR, indican que se requerirían 280 millones de dólares para suplir las cantidades adicionales de N fijado (Hungria *et al.*, 2008).

Sin embargo, debido al contenido de proteína promedio del grano de soja, es fácil estimar la extracción de N del sistema, apelando al rinde por unidad de área. Considerando que entre un 60 y 90% de la necesidad de N es cubierta por la fijación biológica, es claro que la diferencia resultante entre la extracción total y lo aportado por la fijación biológica, es aportada por el N del suelo, ya sea residual o el resultado de la mineralización de la materia orgánica.

La fijación biológica es muy económica para el hombre, pero es muy cara en términos de energía para la planta:



La ecuación nos dice que existe una dependencia total entre la reducción del N<sub>2</sub> atmosférico a N amoniacal dentro de los nódulos y el aprovisionamiento de energía (fotosíntesis - respiración). Así, la planta regula el número de nódulos que puede soportar debido a que la FBN es muy cara para ella.

El alto contenido de proteínas en la semilla, que explica su expansión como soporte de la alimentación humana directa e indirecta, hace que la soja sea el cultivo con mayor demanda global de N. Por eso, éste es el nutriente más crítico y su rendimiento final es función directa de la capacidad de acumular N por el cultivo. Es decir, que el costo de la asimilación de N es elevado en carbohidratos, ya sea para la absorción, la fijación del N<sub>2</sub> y su reducción a la forma acídica, los que compiten con las otras necesidades de la planta.

Si la demanda de N por el cultivo superara la oferta diaria de N, el N absorbido y asimilado previamente, puede suplir parte de la demanda por removilización. No obstante, una consecuencia primaria del déficit de N es la disminución de la fotosíntesis de las hojas, a medida que declina el contenido de N, produciéndose tejidos con menor concentración de N.

Los nódulos de las leguminosas producen hasta diez veces su propio peso de N por día. Para evitar la auto inhibición necesitan eliminar el N asimilado de los nódulos haciéndolo vía transporte rápido por el xilema, que lleva el agua desde las raíces a la parte superior de la planta. En sentido contrario, por el floema, los nódulos se nutren con los fotosintatos producidos en las partes verdes de la planta. Así los nódulos de los Rhizobios actúan como simples bacteroides productores de NH<sub>4</sub>, dejando a la planta pagar el costo de la asimilación.

En la fijación de  $N_2$  por las leguminosas, los principales productos de asimilación nitrogenada transportados en el xilema después fijación de  $N_2$ , son los ureidos (78%) y aminoácidos (20%) del total de N, siendo el ácido alantoico, la alantoína y la asparagina, los aminoácidos predominantes en ese orden (Streeter, 1979); demostrando que estos ureidos juegan un rol dominante en el transporte de N en soja nodulada, y que la síntesis de ureidos depende de la nodulación y la fijación de  $N_2$ . El nitrato está universalmente ausente en el floema, independientemente de la forma de nutrición nitrogenada, siendo los aminoácidos el medio de transporte del N en la re-translocación (Warembourg y Fernández, 2006).

La translocación de nitrógeno es un proceso importante en la vida de las plantas. Las hojas jóvenes son alimentadas con aminoácidos hasta que han alcanzado la madurez (Milthorpe y Moorby, 1969). Cuando ocurren encharcamientos temporarios, que conducen a la hipoxia de las raíces y desaparición de los nitratos, hay un incremento en alanina en la savia del xilema, que es resultado principalmente de cambios en el metabolismo de las raíces y en menor medida en los nódulos (Thomas y Sodek, 2006). Los niveles de glutamina y ureidos disminuyen agudamente en la savia del xilema en estas condiciones indicando fallas en la fijación de  $N_2$  (Amarante y Sodek, 2006).

Una vez en la planta, el N de los compuestos citados con anterioridad se convierte en compuestos orgánicos nitrogenados de bajo peso molecular y luego, tiene lugar la síntesis de compuestos nitrogenados de alto peso molecular (Mengel y Kirkby, 1987). Estos compuestos incluyen proteínas y ácidos nucleicos. Los compuestos nitrogenados orgánicos de bajo peso molecular y, particularmente, los aminoácidos sirven como bloques de construcción para estas reacciones de síntesis. El tercer paso representa la ruptura de las macromoléculas que contienen N por las enzimas hidrolizantes. Las tres fracciones están influenciadas por la nutrición y en particular por el suministro de N. Incrementando el nivel de nutrición nitrogenada resulta en un aumento general en todas las fracciones, pero la extensión, en la cual ocurren estas, difieren entre sí, por ejemplo, ante las aplicaciones de fertilizantes nitrogenados o la presencia de altos niveles de N inorgánico en el suelo, el contenido de compuestos amino-solubles (aminoácidos libres, aminas, amidas) aumenta considerablemente, mientras que el contenido de proteínas sólo aumenta en una limitada extensión. Se encontró un 6, 36 y 58% del total de N como ureido, aminoácidos y nitratos, respectivamente, cuando las plantas de soja no noduladas fueron alimentadas con una solución de  $NO_3$  (McClure y Israel, 1979).

El glutamato y la glutamina son los dos primeros aminoácidos sintetizados durante el proceso de asimilación de  $NH_3$ . El glutamato y el aspartato, así como

sus amidas, también se acumulan cuando se aplican a las plantas altos niveles de N inorgánico. Bajo tales condiciones, el N inorgánico, obviamente, está siendo asimilado a una tasa más alta que lo que se utiliza los aminoácidos en la síntesis proteica (Mengel y Kirkby, 1987). Además de la función en la composición de aminoácidos como los bloques de proteínas, el nitrógeno es integrante de la molécula de clorofila. De esta forma, las plantas bien nutridas de nitrógeno presentan crecimiento vegetativo intenso y coloración verde oscura.

Cuando el suministro de nitrógeno desde el medio edáfico es inadecuado, el N de las hojas más viejas se moviliza para alimentar los órganos más jóvenes de la planta. Por esta razón, las plantas que sufren de deficiencia de N muestran primero los síntomas de deficiencia en las hojas más viejas. En tales hojas, las proteínas se han hidrolizado (proteólisis) y los consiguientes aminoácidos se han redistribuidos a los brotes y hojas más jóvenes. La proteólisis deriva en un colapso de los cloroplastos, que resulta en una disminución del contenido de clorofila. De aquí que el amarillamiento de las hojas más viejas es el primer síntoma de una inadecuada nutrición nitrogenada.

La re-movilización de proteínas (C y N) desde los tejidos viejos a los nuevos, ocurre durante el crecimiento vegetativo, pero éste se duplica cuando comienza el llenado de las semillas y la velocidad de este proceso depende de la tasa de desarrollo de los órganos reproductivos. La extensión de la movilización de proteínas disponibles resultará en más cantidad de grano producido que si el flujo de amidas sólo proviniera de la absorción de N o fijación de  $N_2$ . A medida que se movilizan las proteínas, declina el porcentaje de N en las hojas, la tasa fotosíntesis y la respiración de mantenimiento, comenzando la caída de las hojas inferiores. También ocurre la pérdida de masa foliar y el nivel de proteína desde los tallos, (Boote *et al.*, 1998).

La senescencia de hojas y pecíolos dependen de la movilización de proteínas y se incrementa en condiciones de stress hídrico. Sin embargo, la fase de senescencia a madurez fisiológica (R7) causa que todas las hojas caigan, aun cuando haya finalizado el llenado de granos (Boote *et al.*, 1998).

### *Almacenamiento en la semilla*

Las proteínas están almacenadas en discretas partículas en el grano, llamadas cuerpos proteicos, que se estima contienen al menos entre el 60 y 70% del total de proteínas. Las proteínas de la soja pertenecen a la familia de las globulinas proteínas de almacenamiento, llamadas legumininas (11S) y vicilinas (7S) o glicinina y beta-conglicinina. Los granos contienen un tercer tipo de proteína de reserva llamada gluten o “prolaminas”. La soja además contiene proteínas

metabólicas biológicamente activas tales como: enzimas, inhibidores de tripsina, hemaglutininas y cisteína proteasa (Egli y Tekrony, 1995). Además del N en forma proteica, 10% del N total se encuentra como ácido maleico y un 5% aproximadamente de aminos solubles (Mengel y Kirkby, 1987).

La composición química y valores de energía de muestras de soja se expresan en la Tabla 3.1 (Lima, 1999). A pesar de los bajos niveles de aminoácidos sulfurados, la soja es la principal fuente de lisina en dietas de cerdos y se complementa con maíz en la formulación de las dietas. Además, el contenido de aceite la convierte en una excelente fuente de energía, aunque su energía cruda no es muy metabolizable.

**Tabla 3.1.** Promedios de nutrientes analizados en muestras de granos de soja (Lima, 1999).

Nutriente	Promedio	
Energía, (cerdos)	<i>n</i>	<i>Kcal kg<sup>-1</sup></i>
Energía cruda	14	5,155
Energía digestible	4	4,025
Energía metabolizable	4	3,824
Otras		%
Extracto éter	28	15.62
Fibra cruda	15	8.54
Proteína cruda	40	36.63
Lisina	6	2.34
Metionina	5	0.47
Metionina + Cistina	5	1.09
Treonina	6	1.32
Triptófano	6	0.45

n = Numero de muestras

Tomando en cuenta la diversidad de las características de las zonas de producción, el clima durante el ciclo y las condiciones de almacenamiento, es lógico que la soja, producida en diferentes regiones, tenga distinta composición mineral y nutricional. Los esfuerzos para superar el contenido general de 35-40% de proteína están encaminados para aumentar su valor nutritivo. Aun, elevando el contenido proteico, se duda si la calidad lo hace también. Esta puede mejorarse, significativamente, aumentando la concentración de aminoácidos azufrados como la cisteína y la metionina. De hecho, muestras con mayores contenidos de proteína poseen cantidades significativamente más bajas de aminoácidos azufrados, mientras que los que tienen bajos contenidos de proteína,

exhiben importantes valores de cisteína y metionina. La aplicación de nitrógeno eleva el contenido de proteína, pero disminuye los aminoácidos azufrados. (Mello Filho *et al.*, 2004).

### 3.3. Fósforo

Las plantas absorben fósforo, preferencialmente, como anión  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y en menor proporción  $\text{HPO}_4^{2-}$ . Los primeros compuestos orgánicos formados con fósforo en la planta, son las fosfohexasas y bifosfato de uridina, los precursores del ATP. El fosfato ocurre en las plantas, en forma inorgánica, como ortofosfato y en una menor extensión como pirofosfato. Las formas orgánicas de fosfato son compuestos en que el ortofosfato es esterificado con grupos oxhidrilo de azúcares y alcoholes o enlazados por un pirofosfato ligado a otro grupo fosfato. El compuesto más importante en que el grupo fosfato está vinculado por enlaces pirofosfatos, es el ATP o adenosina trifosfato, con una importante función en las plantas como constituyente de compuestos almacenadores de alta energía (Mengel y Kirkby, 1987).

La energía absorbida durante la fotosíntesis, o liberada durante la respiración o por ruptura anaeróbica de carbohidratos, es utilizada en la síntesis del enlace pirofosfato del ATP. De esta forma, la energía puede llevarse a diversos procesos como la germinación, la absorción activa de iones y la síntesis de diversos compuestos orgánicos. Generalmente, en estos procesos hay una reacción inicial de fosforilación. Esto implica la transferencia del grupo fosforil del ATP a otro compuesto y el compuesto fosforilado se carga con energía (reacción primaria), quedando habilitada para participar de posteriores procesos metabólicos. Otros compuestos que contienen fósforo son derivados del inositol (fitinas), fosfolípidos y otros ésteres.

Es evidente que la exclusiva función del fosfato en el metabolismo es la formación de enlaces pirofosfato que permiten la transferencia de energía. La uridina-trifosfato (UTP), citidin-trifosfato (CTP) y guanosa trifosfato (GTP) son compuestos análogos al ATP. La uridin trifosfato se requiere para la síntesis de sacarosa y callosa, la CTP para la síntesis de fosfolípidos y el GTP para la formación de celulosa. Todo estos nucleótidos trifosfatos (ATP, UTP, GTP y CTP) están, también, involucrados en la síntesis de ácido ribonucleico (RNA). Para la síntesis del ácido deoxiribonucleico (ADN) se requiere la “forma deoxi” del nucleótido trifosfato. En la “forma deoxi” la ribosa del nucleótido está sustituido por una desoxirribosa.

El fósforo es responsable de muchas otras características de crecimiento de las plantas, como la utilización de azúcares y amidas, la formación de núcleos y la

división celular, la organización de las células y la transferencia de la herencia. Plantas en crecimiento presentan importantes valores de P en los tejidos meristemáticos. El grupo fosfato puentea en los ácidos nucleicos, la ribosa (RNA) o la desoxirribosa (ADN) con otra ribosa o desoxirribosa por dos enlaces éster. El ADN es el transportador de información genética y las diversas formas de RNA funcionan en la síntesis proteica. Tales fosfatos orgánicos (azúcares y alcoholes fosforilados) son principalmente compuestos intermediarios del metabolismo. El fosfato está también unido a compuestos lipofílicos, en particular, en derivados fosfatidil (fosfolípidos) como la lecitina.

El fósforo se transloca rápidamente dentro de la planta y puede moverse desde los tejidos más maduros hacia los más jóvenes, en condiciones de baja disponibilidad en el suelo. En las plantas adultas, gran parte del fósforo se mueve a los frutos semillas.

Debido a la buena movilidad del fósforo en la planta, el síntoma adonde aparece inicialmente es en las hojas más viejas y caracterizado por un color anormal verde oscuro azulado o bronceado. La coloración púrpura se debe a la disminución de síntesis de proteínas cuando el fósforo es deficiente, lo que resulta en un aumento de la cantidad de azúcares en los órganos vegetativos. La mayor concentración de azúcares favorece la síntesis de antocianinas en las hojas, lo que produce esa coloración.

Este resumen, sobre el rol del fósforo, es apenas una muestra del papel universal y esencial del fosfato, no sólo en la soja sino en las plantas, en general, así como en todos los demás organismos vivos.

#### *Almacenamiento en la semilla*

El compuesto orgánico de P que ocurre, principalmente, en los granos de soja y otras especies es la fitina. La fitina ocurre como sales de Ca y Mg del ácido fítico, un éster hexafosfórico de inositol y se forma durante la génesis de las semillas. Inmediatamente después de la polinización, hay un aumento en el transporte de P hacia las semillas jóvenes en desarrollo. El fósforo de la fitina en las semillas se considera una reserva, éste se moviliza y convierte a otras formas de fosfatos necesarias para el metabolismo de las plantas jóvenes durante la germinación.



### 3.4. Potasio

El potasio es uno de los tres principales nutrientes minerales inorgánicos, junto con los dos precedentes N y P. No sólo lo es cuantitativamente, ya que es el elemento mayoritario junto con los cuatro principales elementos componentes de las proteínas y carbohidratos con el N, O y H, sino que su importancia deriva de la multiplicidad de funciones. Es el catión más importante por sus funciones fisiológicas y bioquímicas.

El potasio se absorbe como catión monovalente ( $K^+$ ) presente en la solución del suelo y permanece sin formar parte de ninguna molécula orgánica durante todo el ciclo vital, a diferencia de los demás elementos minerales.

Una característica principal del  $K^+$  es la mayor velocidad con que se absorbe y moviliza por los tejidos, como resultado de ionóforas o canales hidrofílicos presentes en las membranas, las que permiten una buena permeabilidad. Una de las consecuencias de esta movilidad es el transporte desde los tejidos más maduros a los más nuevos, incluidos los meristemáticos.

Esta buena permeabilidad de membrana, también conduce a un considerable eflujo de  $K^+$  desde la célula, si la actividad metabólica disminuye (Mengel y Pflüger, 1972). La retención de  $K^+$  en la célula depende, principalmente, del potencial negativo de la célula, si éste disminuye, por ejemplo al afectarse la respiración, también decrece la capacidad de retención del  $K^+$ .

A lo largo de todo el ciclo vital de la mayoría de las plantas, este elemento desempeña un papel importante en gran parte de las funciones fisiológicas de la planta. Como resultado de sus características, entre ellas la buena permeabilidad para atravesar las membranas, el  $K^+$  es muy importante para varios procesos biológicos, entre los que se mencionan: *a)* Fotosíntesis y transporte a larga distancia; *b)* Metabolismo del nitrógeno en la síntesis de proteínas, *c)* Neutralización de ácidos orgánicos, *d)* Activador de enzimas, *e)* Crecimiento de tejidos meristemáticos, *f)* Movimiento de los estomas y estado hídrico y más recientemente; *g)* Resistencia a las enfermedades, en particular de la soja.

#### *Roles específicos del potasio*

El efecto positivo del  $K^+$  en la fotosíntesis aumentando la tasa de asimilación de  $CO_2$ , ha sido documentado por Peoples y Koch (1979), aparentemente a través de una estimulación de la actividad de la ribulosa bifosfato carboxilasa. El  $K^+$  realza la translocación de fotosintatos, promoviendo no sólo la de aquellos recién sintetizados sino que tiene, también, un efecto beneficioso en la movilización del material almacenado, a través de los mecanismos implicados

en el transporte del floema (Lang, 1983). El  $K^+$  es el catión abundante presente en el floema y por ello se transporta a larga distancia dentro de la planta, tanto hacia los brotes en crecimiento como hacia la raíz (Malek y Baker, 1977). Se especula que en este proceso el  $K^+$  contrarresta la carga negativa del anión malato como ión de contracarga, que se transporta desde los puntos de crecimiento hacia la raíz adonde se metaboliza por respiración. Durante ésta, los equivalentes aniónicos del malato son transferidos al  $HCO_3^-$ , que se liberan desde las raíces hacia la solución de suelo, funcionando en la absorción activa de otros aniones como los nitratos, los que así se translocan hacia arriba por el xilema junto con el ión  $K^+$ , que actuó originalmente como el ión de contracarga para el movimiento hacia abajo del malato.

**Metabolismo del nitrógeno en la síntesis de proteínas.** El K tiene un papel importante en la conversión de azúcares y compuestos nitrogenados simples a compuestos de gran peso molecular a partir de la sacarosa, fructosa o aminoácidos que se acumulan en la biomasa. Las plantas superiores mantienen sistemas metabólicos adonde la síntesis y destrucción de proteínas ocurre simultáneamente y los dos procesos no son dos fases de un sistema reversible, sino que están compuestas de dos grupos separados de reacciones. Los sistemas enzimáticos son regulados por enzimas que contienen potasio. El potasio aumenta la absorción de N y su incorporación a proteínas, reduce la acumulación de N inorgánico.

**Neutralización de ácidos orgánicos.** Precisamente, una de las funciones vitales más importantes es mantener el equilibrio de cargas en las células, contrarrestando los iones con cargas negativas presentes en el citoplasma. A través de esta función, surge la importancia del potasio como principal catión inorgánico, con papel dominante en la osmorregulación (Hsiao y Läuchli, 1986).

**Activación de enzimas.** Una función clave del  $K^+$  en bioquímica es la activación de diversos sistemas enzimáticos, como surge de la inhibición de la síntesis de almidón ante una deficiencia de K, resultando una acumulación de carbohidratos solubles y azúcares reductores, ya que la utilización metabólica de estos compuestos requiere la actividad de uno más de los sistemas enzimáticos (p. ej. sintetasas) que requieren potasio u otros cationes univalentes (Evans y Sorger, 1966). Se han encontrado funciones al K en la regulación de más de 60 enzimas que catalizan una gran cantidad de actividades metabólicas (Suelter, 1970).

**Crecimiento meristemático.** El  $K^+$  está implicado en el crecimiento de los meristemas (Jacoby *et al.*, 1973). Para que ocurra el alargamiento de las células, la extensibilidad de la pared celular y la acumulación de solutos deben aumentar

y así mantener un determinado potencial osmótico. El crecimiento de las células y por extensión, de las plantas, es regulada parcialmente por iones K asociados a los iones inorgánico y de ácidos orgánicos (Mengel y Arneque, 1982).

**Régimen hídrico.** El potasio es de máxima importancia para la condición hídrica de las plantas. La absorción de agua en células y tejidos es consecuencia de la absorción activa de  $K^+$  (Läuchli y Pflüger, 1978). El turgor de las células de las hojas en los tejidos jóvenes depende de su contenido de  $K^+$ , el que a su vez se requiere para la expansión de las células. Por otra parte, ha sido ampliamente demostrada la mayor eficiencia de uso del agua en cultivos bien provistos con potasio. Esta mayor eficiencia, por menores pérdidas de agua, se debe a una reducción en la transpiración, que depende no sólo del potencial osmótico de las células del mesófilo sino también por una respuesta diferencial de la apertura y cierre de los estomas, adonde precisamente también el  $K^+$  juega un papel significativo en el mecanismo de la apertura y cierre (Hsiao y Läuchli, 1986).

Bajo deficiencia severa de K, se reduce la lignificación de los paquetes vasculares, contribuyendo a la alta susceptibilidad al vuelco (Marschner, 1995). La fuerza impulsora de la afluencia de K a partes localizadas en la planta, permite la reorientación mecánica de las hojas en respuesta a señales lumínicas. Esta respuesta fototrópica permite a las plantas aumentar la capacidad de interceptación de la luz y así maximizar la fotosíntesis o bien evitar el exceso de luz y proteger a las hojas de una alta intensidad de luz (Koller, 1990).

**Resistencia a enfermedades.** En condiciones de deficiencia de K es frecuente detectar plantas con paredes celulares delgadas, tallos y pecíolos débiles, un menor desarrollo de raíces y concentraciones excesivas de N que pueden facilitar el ingreso de patógenos en las plantas. Estos últimos, en condiciones de bajo nivel de K o de relaciones K/N, son fuentes de alimentos para enfermedades y plagas (Yamada, 2005). Algunos estudios muestran que aumentos en la ocurrencia de cancro del tallo (*Diaporthe phaseolorum*) y mancha marrón (*Septoria glycines*) han sido asociados con suelos con baja concentración de K extractable y sin fertilizar con este elemento (Fixen *et al.*, 2004). También se ha considerado que el K es un elemento importante para el mejor control de *Phomopsis*, *Cercospora kikuchii* y *Diaporthe phaseolorum*, inclusive, habría una reducción en la aparición de síntomas de roya asiática de la soja (*Phakopsora pachyrhizi*), bajo adecuada fertilización con KCl (Mascarenhas *et al.*, 2004). En ambientes deficitarios en K característicos de la región de los Cerrados de Brasil, áreas bien fertilizadas con K logran un mejor control de la aplicación de fungicidas (Suzuki y Yuyama, 2004). La mala calidad de semillas junto con aumentos en la severidad de infecciones por

*Phomopsis*, se encuentran en escenarios de baja disponibilidad potásica (Jeffers *et al.*, 1982), así como una menor incidencia de enfermedad en las semillas al fertilizar con K (Franca Neto *et al.*, 1985). Se piensa sin embargo, que una buena disponibilidad de potasio por la fertilización, contribuye a la mejor sanidad por un buen crecimiento de las plantas y a una interacción positiva con otras medidas de control, entre ellas las pulverizaciones de fungicidas, elección de genotipos y sobre todo, a una fertilización balanceada (Huber y Arny, 1985). En este sentido, Piccio y Franje (1980) indican que la severidad de roya sería menor, luego de la fertilización combinada con P y KCl.

### 3.5. Azufre

Considerando la importancia que tiene la soja en la provisión de proteínas al mundo, es explicable la relevancia del rol del azufre en la nutrición de esta especie, ya que el S es uno de los constituyentes de los aminoácidos esenciales azufrados, cisteína y metionina. Por lo tanto en condiciones de deficiencia, la síntesis de estas proteínas es inhibida y la calidad del grano, o sus derivados como alimento animal, se deteriora significativamente (Tabla 3.1).

El azufre es absorbido y transportado desde las raíces hacia el resto de la planta como ión sulfato  $\text{SO}_4^{2-}$ . El sulfato se transloca, principalmente, en dirección hacia arriba (acrópeto) y la capacidad para mover S en dirección hacia abajo (basípeto) es relativamente deficiente. El S de las hojas más viejas, sin embargo, no contribuye al suministro de S a los tejidos más jóvenes. Esto demuestra que no se da una translocación en contra de la corriente de transpiración (Marschner, 1995).

La asimilación de azufre se asemeja bastante a la del nitrógeno, o sea, debe reducirse para que sea incorporado a los aminoácidos, que posteriormente harán parte de proteínas, coenzimas y de otros compuestos. La asimilación y reducción del  $\text{SO}_4^{2-}$  incorpora el S reducido a una molécula orgánica, siendo la cisteína la primera molécula estable. También el ión sulfato puede ser incorporado a la estructura orgánica sin reducción, tal como los sulfolípidos o polisacáridos. El grupo sulfhidril SH de la cisteína puede transferirse a la fosfohomoserina para formar cistationina, que se divide para producir homocisteína.

La cisteína y la metionina son los aminoácidos de S más importantes en las plantas, donde se dan tanto como aminoácidos libres o constituyendo bloques de proteínas. El S es parte de los enlaces disulfuro (S-S- enlace) que hace de puente entre las cadenas de polipéptidos. De forma similar, un enlace disulfuro puede servir de cruce entre dos cadenas de polipéptidos o entre dos puntos en una única cadena. La formación de estos enlaces, disulfuro-S, contribuyen a la

conformación de enzimo-proteínas. Una función adicional esencial de los grupos SH en el metabolismo, es su participación directa en reacciones enzimáticas.

Por eso, ante condiciones de deficiencia de azufre e inhibirse la síntesis de proteínas, se observa un concomitante aumento de amidas, acumulándose N-orgánico soluble y nitrato (Marschner, 1995). En hojas verdes, la mayoría de las proteínas están localizadas en los cloroplastos, ligadas a la clorofila. Por lo tanto, plantas deficientes en azufre presentan menores tenores de clorofila y consecuentemente una coloración verde pálida. Así se desarrolla el síntoma característico de la deficiencia, pero a diferencia de la falta de nitrógeno, esta difiere en que la distribución es más uniforme sobre las hojas más viejas y jóvenes, mientras que la mayor movilidad del N hace que las deficiencias se observen casi en las hojas más maduras.

En las leguminosas, al desencadenarse la deficiencia de azufre, la actividad de la nitrogenasa en los nódulos de las raíces, es mucho más afectada que la fotosíntesis, pudiendo confundirse los síntomas de deficiencia de azufre con los de nitrógeno. En esta situación, el análisis foliar puede ser valioso para ayudar a definir la causa de la sintomatología observada. Así, en plantas deficientes en azufre, un nivel de  $\text{SO}_4^{2-}$  es muy bajo mientras que los de  $\text{NO}_3^-$  son altos. Por otro lado, en plantas con deficiencia de nitrógeno, el nivel de N soluble es reducido y el de  $\text{SO}_4^{2-}$  es normal (Marschner, 1995).

#### *Almacenamiento en la semilla*

A pesar del alto contenido de proteínas del grano de soja, estas son normalmente deficientes en los aminoácidos azufrados, metionina y cisteína. Por ello, la extracción de S del grano es relativamente baja. Las hojas alimentan las semillas en desarrollo con un 20% del requerimiento total de S, mientras que las vainas tienen un rol importante en el almacenamiento y movilización de S a los granos y, en general, el S de las semillas depende fundamentalmente de aquel absorbido en periodos previos, así vainas y semillas dependen del S movilizado. (Sunarpi y Anderson, 1997; Naevea y Shiblesb, 2005). Los granos contienen casi 90% del S absorbido durante el periodo reproductivo y la diferencia de redistribución interna del S de hojas.

### **3.6. Calcio**

El calcio es absorbido por la planta en la forma de catión divalente  $\text{Ca}^{2+}$ . A pesar de haber una mayor concentración de calcio que de potasio en la solución del suelo (cerca de 10 veces), la tasa de absorción en relación a otros nutrientes

catiónicos es generalmente menor. Este menor potencial de absorción del  $\text{Ca}^{2+}$  ocurre porque éste puede absorberse sólo por las puntas nuevas de las raíces más jóvenes, donde las paredes celulares de la endodermis están aún sin suberizar (Clarkson y Sanderson, 1978). Según estos autores, además de esta característica, la absorción de calcio sufre la competencia de otros cationes, como  $\text{NH}_4^+$ , que tiene mayor velocidad de absorción.

Las plantas superiores frecuentemente contienen Ca en cantidades apreciables y por lo general en el orden de 5 a 30 mg Ca  $\text{g}^{-1}$  de MS (0.005 - 0.03%). Estos altos contenidos, sin embargo, son principalmente el resultado de importantes niveles de Ca en la solución de suelo más bien que de la eficiencia del mecanismo de absorción de Ca por las células de raíz. En la planta, el calcio se transporta hacia arriba por flujo de masa, la que depende de la tasa de transpiración. La redistribución, sobre todo hacia abajo, del  $\text{Ca}^{2+}$  se da a través del floema, pero la removilización desde los tejidos más viejos se dificulta porque su transporte se da en concentraciones muy pequeñas en el floema (Wiersum, 1979). Por eso, una vez que el Ca se deposita en las hojas más maduras no puede movilizarse a los brotes en crecimiento, resultando que los síntomas de deficiencia se observan en dichos brotes, ya que no pueden utilizar el  $\text{Ca}^{2+}$  almacenado en las hojas más maduras.

Se supone que los niveles extremadamente bajos de  $\text{Ca}^{2+}$  en la savia del floema resultan de una acumulación de  $\text{Ca}^{2+}$  en las células que lo rodean, formando compuestos precipitados como fosfatos, pectatos y oxalatos de baja solubilidad, lo que explica las bajas concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  en el floema (Marschner, 1995).

Como resultado de este mecanismo, los órganos de la planta que alimentados desde el floema poseen poco contenido de Ca y mucho de K y Mg. Esta relación se evidencia cuando se comparan los contenidos de Ca y de K de las hojas con los de los frutos y tejidos de almacenamiento. El suministro deficiente de  $\text{Ca}^{2+}$  a estos últimos, provoca frecuentes síntomas de deficiencias de Ca en estos tejidos.

Trabajos publicados de Mengel y Kirkby (1987) y Marschner (1995) presentan las diversas funciones del calcio en la planta. Además de ser el constituyente de la pared celular, el Ca está asociado con grupos carboxílicos libres de las pectinas y satura la mayor parte de estos sitios. Su importancia es decisiva en la elongación celular, por lo que su deficiencia en el suelo puede causar desde adelgazamiento hasta muerte gradual de las puntas de las raíces. La permeabilidad de la membrana y manutención de la integridad celular depende, también, de una adecuada concentración de calcio en los tejidos, así como el

crecimiento del polen, su germinación y crecimiento del tubo polínico. En el proceso metabólico, el calcio afecta la actividad de hormonas y de enzimas, como las que regulan la senescencia y abscisión de las hojas y frutos.

La necesidad del  $\text{Ca}^{2+}$  es crítica para el elongamiento y la división celular, el crecimiento de los pelos radiculares, la activación de enzimas y producción normal de las paredes celulares. Por su participación en la pared celular, el calcio mejora la resistencia de las plantas a las enfermedades. El crecimiento de la planta puede demostrarse con facilidad, interrumpiendo el suministro de  $\text{Ca}^{2+}$  a las raíces. Su tasa de crecimiento será inmediatamente reducida y después de algunos días las puntas de la raíz se vuelven castañas y gradualmente mueren.

En plantas que son pobremente suministradas con Ca, las membranas se desestabilizan. El papel del  $\text{Ca}^{2+}$  en estabilidad de membrana no sólo es de importancia en la absorción de iones sino también en otros procesos metabólicos. Los caracteres típicos distintivos de senescencia por ejemplo, son similares a la deficiencia de Ca y pueden ser retardados por el  $\text{Ca}^{2+}$ .

La deficiencia de calcio en las plantas de soja provoca un síntoma denominado de colapso del peciolo, adonde este muestra una doblez y posteriormente se da la caída del foliolo (Burton *et al.*, 2000). Un déficit hídrico causaría la deficiencia aun cuando el suelo tuviese tenor suficiente en calcio, ya que ese nutriente alcanza los tejidos y puntos de crecimiento a través de la evapotranspiración.

El Ca está localizado especialmente entre el citoplasma y pared celular, indicando importantes contenidos de Ca en el plasmalema. La mayor parte del Ca presente en los tejidos de la planta, está localizado en el apoplasto y en las vacuolas, como  $\text{Ca}^{2+}$  libre y  $\text{Ca}^{2+}$  adsorbido a iones indifusibles como grupos carboxílicos, fosforílicos e hidroxifenólicos. También se presenta en oxalatos, carbonatos y fosfatos de Ca (Gossett *et al.*, 1977).

Marschner (1995) sugiere que el bajo contenido de Ca, en los órganos de almacenamiento, induce a una gran permeabilidad de membrana, permitiendo la difusión de sustancias disueltas en estos tejidos. Obviamente, esto es de suma importancia en frutos y órganos de almacenamiento que acumulan grandes cantidades de azúcares del floema.

Estos compuestos con frecuencia ocurren como depósitos en las vacuolas de las células. En los granos de soja y las semillas en general, el Ca está presente predominantemente como sal del ácido inositol hexafosfórico (ácido fítico).

### 3.7. Magnesio

Las plantas absorben el magnesio de la solución del suelo en la forma de catión divalente  $Mg^{2+}$ . En general, las plantas poseen una limitada capacidad de absorberlo y transportarlo dentro de la planta. Su tasa de absorción puede reducirse mucho por otros cationes como el  $K^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ , así como por el  $H^+$  (Legett y Gilbert, 1969). Generalmente, el magnesio se absorbe en menores cantidades que el  $Cl^-$  o  $K^+$  y su concentración no sobrepasa el 0.5% de la materia seca de los tejidos vegetales (Mengel y Kirkby, 1987).

El papel más conocido del Mg es su ocurrencia en el centro de la molécula de clorofila, con la que forma enlaces covalentes, pero la fracción del Mg total de la planta asociada con la clorofila es sólo en el orden de 15 a 20% (Neales, 1956). Una gran proporción del Mg total está relacionada a la regulación del pH del contenido celular y en el balance catiónico-aniónico (Marschner, 1995).

Además de su función en la molécula de clorofila, el  $Mg^{2+}$  se requiere en otros procesos fisiológicos. Estos se relacionan con su movilidad dentro de las células, con su rol como co-factor en casi toda activación de enzimas de procesos de fosforilación y para formar complejos de diferentes estabilidades (Marschner, 1995). Pero, en algunas enzimas, la reacción del Mg no es específica y el  $Mn^{2+}$  es con frecuencia el activador más eficiente.

Al contrario del  $Ca^{2+}$ , el  $Mg^{2+}$  es muy móvil en el floema y por lo tanto, se redistribuye fácilmente desde las hojas y tejidos más viejos para los órganos de mayor exigencia, como los meristemas y los órganos de reserva. De la misma manera que con el  $K^+$ , como los frutos y tejidos de almacenamiento se alimentan desde el floema poseen niveles más importantes de K y Mg que de Ca.

En los tejidos vegetales una gran proporción del total del Mg, frecuentemente más de un 70%, es difusible y asociado con aniones inorgánicos y aniones de ácidos orgánicos, como el malato y citrato. El magnesio está también asociado con aniones indifusibles incluyendo a aniones como oxalato y pectato (Kirkby y Mengel, 1987). En los granos de soja, el Mg esta contenido como sales de ácido fítico.



## 3.8. Micronutrientes

### 3.8.1. Boro

En la solución del suelo, el boro se encuentra predominantemente como ácido bórico sin disociar ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) y es la forma en que lo absorberían las plantas. Si bien el proceso no es activo, no se conoce bien el mecanismo metabólico de absorción. Como ácido muy débil, su tasa de disociación es muy baja y esta baja ionización hace del B un elemento muy lixiviable, ya que no tiene carga eléctrica suficiente, como otros aniones, para ser adsorbido a los coloides.

El boro es relativamente inmóvil en las plantas y con frecuencia los contenidos de B aumentan desde la parte inferior de la planta a la superior (Gupta, 1979). La transpiración influye en el transporte hacia arriba, sugiriéndose que el B se transloca principalmente en el xilema. Esto explica la acumulación de B en las puntas y márgenes de las hojas y el hecho de que esa deficiencia comienza siempre en los puntos de crecimiento. Este comportamiento es similar al del Ca, en que ambos no son móviles o lo son apenas por el floema (Raven, 1980; Dugger, 1983). El B formaría complejos de baja solubilidad y por lo tanto, de difícil redistribución desde las hojas más maduras hacia los puntos de mayor exigencia, como los tejidos meristemáticos. Esto implica la necesidad de un constante suministro o disponibilidad durante todo el ciclo de la planta.

Las plantas necesitan B para varios procesos de crecimiento y en particular: *a)* alargamiento y división celular; *b)* metabolismo de ácidos nucleicos; *c)* germinación del polen y crecimiento del tubo polínico; *d)* síntesis de aminoácidos y proteínas; *e)* biosíntesis y transporte de azúcares y carbohidratos; *f)* estabilidad de las membranas. Pero, a diferencia de muchos elementos esenciales, el B no es un componente de ninguna enzima (Dugger, 1983).

El B es un elemento sensible para la soja ya que se han detectado numerosas casos de respuesta. Inclusive se han identificado cultivares con variaciones en su exigencia (Furlani *et al.*, 2001). Concentraciones en la semilla, menores a 10 ppm, provocan cotiledones deformados y fallas en la germinación, que se trasladan a una menor performance si se cultivan en suelos con bajos contenidos de este elemento (Rerkasem *et al.*, 1997).

Al igual que para una gran variedad de especies, el B es tóxico para la soja a niveles apenas superiores a los necesarios para un crecimiento normal, los efectos de la toxicidad pueden surgir ocasionalmente por un uso excesivo de fertilizantes de B o en suelos con mucho contenido de B (Rossa *et al.*, 2006). El síntoma visible más típico es la quemadura de las puntas y bordes de las hojas,

con manchas cloróticas o necróticas. Adicionalmente, también se ha observado inhibición del metabolismo de los ureidos en las hojas de soja (Nable *et al.*, 1997).

### 3.8.2. Cobalto

Se acepta, en general, que el Cobalto (Co) es esencial para la fijación simbiótica de N<sub>2</sub> y el crecimiento de los Rhizobios (Ahmed y Evans, 1961). Sin embargo, el rol del Co en las plantas todavía es discutido, si bien recientes investigaciones indican un rol en la germinación de la semilla de soja (Samimy, 1978).

En estudios para investigar el efecto del Co en las bacterias simbióticas fijadoras de N<sub>2</sub> *Rhizobium sp.* al aumentar el suministro de Co, aumenta el crecimiento de los Rhizobios, la fijación de N<sub>2</sub>, el contenido de la co-enzima B<sub>12</sub> y la formación de leghemoglobina en el Rhizobio. Se ha concluido que el efecto del Co, en la fijación de N<sub>2</sub>, es el resultado del crecimiento de los Rhizobios y del Co contenido en la vitamina B<sub>12</sub> y su forma de co-enzima cobalamina (Kliewer y Evans (1963).

El efecto del Co no sólo aumenta el peso de los nódulos, el contenido de Co en ellos y el número de bacteroides por nódulo, sino también aumentan las concentraciones de cobalamina y leghemoglobina. El contenido de cobalamina determina el de leghemoglobina, probablemente a través de su efecto en la síntesis en el bacteroide (Dilworth *et al.*, 1979).

### 3.8.3. Cobre

El cobre se absorbe en cantidades muy pequeñas, por un proceso ayudado metabólicamente y compite fuertemente con la absorción del Zn y *viceversa* (Bowen, 1969, Loneragan y Webb, 1993), Sin embargo, la absorción de Cu se relaciona, principalmente, con los niveles de Cu disponible en el suelo. No obstante se discute si el Cu se absorbe como ion Cu<sup>2+</sup> o como quelato (Graham, 1981).

El cobre no es muy móvil dentro de la planta aunque puede transportarse desde las hojas más maduras a hojas más jóvenes. El movimiento de Cu es fuertemente dependiente de su condición dentro de la planta. Plantas de trigo, bien suministradas con Cu, lo re movilizan desde las hojas a los granos con rapidez, pero en plantas deficientes, el Cu está relativamente inmóvil (Loneragan *et al.*, 1981).

El cobre tiene un número de propiedades que en gran parte controla su comportamiento bioquímico. Las enzimas más importantes que contienen Cu

son plastocianina, superóxido dismutasa y amino-oxidasas. El Cu de las enzimas participa en reacciones redox que son en su mayoría dependiente del cambio de valencia. En este aspecto es similar al hierro, aunque éste es mucho más estable que el  $\text{Cu}^+$  (Mengel y Kirkby, 1987).

El cobre influye tanto en el metabolismo de carbohidratos como en el de nitrógeno. En la etapa vegetativa, la deficiencia de Cu puede inducir una disminución de los contenidos de carbohidratos solubles (Brown y Clark, 1977).

Aunque muy rara, es posible observar típicos síntomas de toxicidad por Cu, observando las raíces, que se inhiben rápidamente ante niveles tóxicos.

#### 3.8.4. Cloro

El cloro se absorbe como  $\text{Cl}^-$ , que es la forma como está presente en la solución del suelo y el proceso es metabólicamente activo. Su movilidad dentro de la planta y su redistribución desde las hojas maduras a los puntos de mayor exigencia no tiene limitaciones. La función del Cl en la planta no es muy clara. Se piensa que este micronutriente es esencial para la evolución del agua en el proceso fotosintético. Otro proceso fisicoquímico, afectado por el cloro, es la turgencia de las células, a través de la presión osmótica (Mengel y Kirkby, 1987). La absorción de nitrato y de sulfato puede reducirse por efecto competitivo del cloro en exceso y, por lo tanto, la cantidad y calidad de las proteínas también son afectadas.

Se piensa también que por el carácter bioquímico inerte del  $\text{Cl}^-$ , éste le permite cubrir funciones osmóticas y de neutralización de cationes, que podrían tener consecuencias bioquímicas o biofísicas importantes (Clarkson y Hanson, 1980).

#### 3.8.5. Hierro

El hierro se absorbe por las raíces como catión divalente  $\text{Fe}^{++}$  (Fe ferroso) o como quelato, siendo irrelevante la absorción en forma trivalente (Fe férrico) debido a la baja solubilidad de este último al pH normal de los suelos. La tasa de reducción de Fe es dependiente del pH, siendo mayor a menores pH (Mengel y Kirkby, 1987).

Las especies vegetales difieren en su habilidad para utilizar el apenas soluble Fe inorgánico y los quelatos de Fe, para asegurar la nutrición férrica. Así, la soja es muy diferente del maíz en su eficiencia y mecanismos para sobrellevar ambiente deficientes (Clark y Brown, 1974). Las llamadas plantas eficientes en la utilización del Fe, son capaces de disminuir el pH del medio nutritivo y de ampliar la capacidad reductora de la superficie radicular, bajo condiciones de

estrés férrico, aumentando significativamente la disponibilidad y absorción del Fe por las raíces (Marschner, 1995).

El transporte dentro de la planta también es predominantemente como  $\text{Fe}^{2+}$ . Los tejidos de las plantas pueden presentar cantidades apreciables de  $\text{Fe}^{3+}$  y exhibir síntomas de deficiencia del elemento (Welch, 1995). El hierro presenta baja movilidad entre los diferentes órganos de la planta. Por lo tanto, plantas deficientes presentan los primeros síntomas visibles como clorosis, en las hojas más jóvenes, mientras que las maduras permanecen verdes.

La función mejor conocida del Fe es en sistemas enzimáticos donde las hemo-proteínas funcionan como grupos prostéticos. Estos son como el Mg en la estructura de la clorofila; un átomo de hierro es el centro de un gran anillo heterocíclico orgánico llamado porfirina. Estos sistemas enzimáticos incluyen la catalasa, peroxidasa, citocromo oxidasa, así como diversos citocromos. En las leguminosas, otro papel importante del Fe es en la fijación simbiótica del  $\text{N}_2$  atmosférico, al formar parte de la enzima nitrogenasa.

En plantas verdes hay con frecuencia una buena correlación entre el nivel de suministro de Fe y el contenido de clorofila, teniendo las plantas bien suministradas con Fe, mayores contenidos de clorofila (Mengel y Kirkby, 1987). Las deficiencias de Fe y Mg son similares ya que ambas están caracterizadas por una falla en la producción de clorofila. La deficiencia de hierro, sin embargo, a diferencia de la deficiencia de Mg comienza siempre en las hojas más jóvenes. (Adams *et al.*, 2000).

La clorosis causada por la deficiencia de Fe puede ser provocada por su ausencia absoluta en el suelo, principalmente en suelos arenosos, como también puede ser inducida por el encalado excesivo, aun en suelos con suficiente reservas del nutriente. Es una deficiencia muy difundida en el área sojera de Norteamérica (Clark, 1982; Hansen *et al.*, 2003). En la planta, las mayores concentraciones de bicarbonato, pueden elevar el pH de los tejidos y así, disminuir la solubilidad del hierro, inmovilizándolo. La toxicidad de Fe, en cambio, un fenómeno típico de suelos inundados y sufrido por el arroz, no es evidente en soja, a no ser que ocurra en suelos encharcados temporalmente.

### 3.8.6. Manganeso

Las plantas absorben al Mn como catión que es la forma reducida y soluble en la solución de suelo. Dada la dependencia de la disponibilidad del Mn de las condiciones del suelo, al igual que el Fe, la forma divalente  $\text{Mn}^{2+}$  que es soluble predomina en condiciones reducidas, la nutrición es muy afectada por estos factores. En modo similar a otros cationes bivalentes, el  $\text{Mn}^{2+}$  compite con otros

el  $\text{Ca}^{2+}$  y el  $\text{Mg}^{2+}$ , pero las tasas de absorción son mucho menores que las de estos últimos y parecidas a éstos, es un proceso metabólicamente activo (Mengel y Kirkby, 1987).

Así, en condiciones de encharcamiento (ausencia de  $\text{O}_2$ ), la reducción predomina y aumenta la disponibilidad de Mn, también en suelos ácidos debido a una mayor solubilidad de sus compuestos bajo esta condición. La corrección de la acidez del suelo provoca mayor actividad microbiana que acompleja al Mn, volviéndolo menos disponible, siendo por lo tanto común observar síntomas de deficiencia en suelos recientemente encalados o sobre-encalados.

La movilidad dentro de la planta es intermedia. Entre las funciones del Mn en la planta, la más conocida es su participación en la fotosíntesis, en la partición del agua y el  $\text{O}_2$  en la llamada reacción de Hill. También actúa en el proceso de oxidación, en las reacciones de descarboxilación e hidrólisis en la síntesis de proteínas. A su vez, afecta otras reacciones como la fotofosforilación y la reducción del  $\text{CO}_2$ , de nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) y de sulfatos. El  $\text{Mn}^{2+}$  se parece al  $\text{Mg}^{2+}$  en sus funciones bioquímicas ya que ambas enlazan el adenosin trifosfato (ATP) con el complejo de enzimas fosfoquinasas y fosfotransferasas. Además otras enzimas (decarboxilasas y dehidrogenasas), también son activadas por el  $\text{Mn}^{2+}$ , en la mayoría de los casos el  $\text{Mn}^{2+}$  no es específico para estas enzimas y puede ser sustituido por el  $\text{Mg}^{2+}$  (Marschner, 1995).

Normalmente hay correlación positiva entre los contenidos de Mn en las hojas y el rendimiento y el contenido de aceite en el grano, y correlación negativa entre el contenido de Mn y el de proteínas. Con el aumento del tenor de manganeso en las hojas, superando el nivel deficiente, aumenta la concentración de aceite en los granos de soja desde 22 a 26% y una caída en los tenores de proteína desde 48 a 38% (Wilson *et al.*, 1982).

La toxicidad del manganeso, juntamente con la del aluminio es uno de los factores limitantes del desarrollo de la soja en suelos ácidos, con pH menor a 5.5, (Ohki, 1976). Esta puede ocurrir también en suelos mal drenados o compactados, condiciones que facilitan la reducción del Mn por deficiencias en la aireación. La toxicidad del manganeso está frecuentemente asociada a bajos contenidos de calcio y hierro en los tejidos vegetales (Mengel y Kirkby, 1987). Otro factor, la baja temperatura acentúa los efectos de la toxicidad de manganeso en la planta, visto que el nivel crítico disminuye bajo esa condición (Marschner, 1995).

### 3.8.7. Molibdeno

Los suelos presentan tenores totales de molibdeno (Mo) entre 0.6 a 3.5 ppm y de Mo disponible de alrededor de 0.2 ppm. Es el nutriente de menor concentración en el suelo y también el de menor exigencia por las plantas. El molibdato es un ácido débil, con la disminución de un pH de 6.5 a uno abajo de 4.5, la disociación disminuye y aumenta la formación de poli-aniones. Aun cuando el molibdeno sea un metal, ocurre en la solución del suelo como un oxi-anion en la forma de molibdato  $\text{MoO}_4^-$ , en su forma de valencia más alta (Marschner, 1995). Sus propiedades son semejantes a aquellas de los no metales y de otros aniones inorgánicos divalentes. Así, en suelos ácidos, el fosfato y molibdato tienen un comportamiento parecido en relación a su fuerte adsorción a los óxidos hidratados de hierro. En la absorción, el molibdato compite con el sulfato.

El molibdeno se absorbe por las plantas como  $\text{MoO}_4^{2-}$ . El sulfato hace disminuir su absorción y la elevación del pH la hace aumentar. El molibdeno presenta moderada movilidad dentro de la planta y su concentración, en base a peso seco, es inferior a 1.0 ppm. Al contrario de otros micronutrientes, el molibdeno puede absorberse en cantidad mucho mayor que lo normal, pudiendo llegar hasta 100 veces más, provocando toxicidad.

El molibdeno es esencial para las plantas ya que forma parte de la enzima nitrato reductasa, que reduce al  $\text{NO}_3^-$  absorbido por las plantas a  $\text{NO}_2^-$  y posteriormente a  $\text{NH}_4^+$  para incorporarse a los compuestos orgánicos. Así plantas deficientes en molibdeno presentan relativamente mayor acumulación de  $\text{NO}_3^-$  y menor acumulación de compuestos amino soluble. Como la función más importante del molibdeno en el metabolismo de la planta, es la reducción del  $\text{NO}_3^-$ , existe similitud en los síntomas visuales de su deficiencia, que se muestra como una clorosis inicial en las hojas más maduras. Y al contrario de la deficiencia de nitrógeno, la de molibdeno presenta posteriormente necrosis en los márgenes de las hojas debido a la acumulación de  $\text{NO}_3^-$ . (Mengel y Kirkby, 1987).

Otra función importante del molibdeno, pero indirecta, es en la fijación simbiótica del  $\text{N}_2$  atmosférico. En ese proceso, el Mo es constituyente de la enzima nitrogenasa, que por vez se encuentra en las bacterias y actinomicetos, pero no en las plantas superiores. Los nódulos de las leguminosas pueden concentrar 10 veces más Mo que las hojas. En rindes de alrededor de  $3.0 \text{ mt ha}^{-1}$  de soja se estima que son exportados por el grano cerca de  $2.5 \text{ g de Mo ha}^{-1}$ .

### 3.8.8. Zinc

La absorción de Zn se realiza, principalmente, como catión divalente  $Zn^{2+}$  de la solución de suelo y ayudado por una proteína con una gran afinidad por el Zn a bajos valores de pH, siendo, probablemente, como  $Zn(OH)_2$  a valores altos. El transporte dentro de la planta se da tanto como  $Zn^{2+}$ , como unido a ácidos orgánicos. Estos últimos, en forma de compuestos de bajo peso molecular, son la fracción fisiológicamente más activa. Se acumula en las raíces pero se transloca a los brotes cuando es necesario. Es relativamente móvil, translocándose desde las hojas maduras a los órganos en desarrollo (Alloway, 2008).

En las plantas, el Zn actúa como co-factor funcional estructural o regulatorio de un gran número de enzimas, habiéndose identificado más de 70 de estas metaloenzimas. Entre los sistemas enzimáticos más importantes se mencionan: carbónico anhidrasa (transporte de  $CO_2$  en fotosíntesis), varias dehidrogenasas, aldolasas, carboxi peptidasas, fosfatasa alcalina, RNA polimerasa (síntesis de proteínas), ribulosa bifosfato carboxilasa (formación de almidón), superóxido dismutasa y fosfolipasa, (Srivastava y Gupta, 1996).

Las funciones fisiológicas vinculadas al Zn se clasifican en: *a*) Metabolismo de carbohidratos: afecta la fotosíntesis, las transformaciones de azúcares y la formación de almidón; *b*) Metabolismo de proteínas: a través de su intervención en la estabilidad y función del material genético (estabilidad del RNA), *c*) Integridad de las membranas: el Zn se requiere para el mantenimiento de estas a través de su interacción con fosfolípidos y grupos sulfidril de las proteínas de la membrana; *d*) Metabolismo de auxinas: requerido para la formación del ácido indol-acético ya que su precursor el triptófano, precisa de Zn. La deficiencia de este proceso es la causa de los síntomas de deficiencia, plantas pequeñas y entrenudos cortos. Además afecta procesos reproductivos disminuyendo severamente la floración y producción de semillas cuando el Zn es limitante (Brown *et al.*, 1993).

### 3.9. Patrón de absorción de nutrientes

Las curvas de absorción de nutrientes del cultivo de soja son similares a las de otros cultivos en su característica forma sigmoidea. El desarrollo conceptual y gráfico fue largamente conocido por el trabajo de Hanway y Thompson (1967) y Hanway y Weber (1971). Valores cuantitativos de absorción y acumulación de nutrientes fueron establecidos hace más de tres décadas por Harper (1971) y Leggett y Frere (1971), en cultivos hidropónicos o a campo (Osaki *et al.*, 1991).

La absorción de los principales nutrientes es baja durante los primeros 30 días después de la emergencia. Al inicio de la floración, la absorción de nutrientes aumenta drásticamente, alcanzando las tasas máximas entre la plena floración y el llenado de granos. En esta fase, la simbiosis también es máxima y coincide con una importante actividad fotosintética y demanda de agua y nutrientes, resultando así una gran actividad biológica.

La absorción de N, P y K disminuye, generalmente, durante las últimas etapas de desarrollo, mientras que la absorción del Ca y del Mg no desciende o aumenta. Las diferencias entre los patrones de la absorción de macronutrientes durante la última etapa, se reflejan en la movilidad y translocación de los distintos nutrientes. El porcentaje de N, en la parte aérea, disminuye gradualmente desde la etapa de plántula hasta nivelarse luego de la floración.

La concentración del P aumenta durante los primeros 30 días desde la emergencia, hasta un máximo al comienzo de la floración, declinando luego hasta el llenado de grano y nivelándose otra vez. El porcentaje de K aumenta levemente, desde la etapa de plántula hasta la plena floración, disminuyendo después. La concentración del Ca aumenta hasta el inicio de la floración, disminuyendo y nivelándose después durante las últimas etapas del crecimiento, mientras que la concentración de Mg y de los micronutrientes (Fe, Mn, Zn, Cu y B) disminuyen, en general, gradualmente desde la etapa de plántula hasta R5-6 (Harper, 1971). Si bien cada genotipo muestra diferencias en sus características como la duración del ciclo, el tipo de crecimiento, las características climáticas para el cultivo, el patrón de absorción de nutrientes es similar (Tanaka *et al.*, 1993).

Las tasas de crecimiento dependen de la concentración de nutriente en el medio, aun cuando la cantidad de nutriente no es limitante. Las tasas de absorción de los nutrientes son proporcionales a la tasa de crecimiento durante dicho período (Legget y Frere, 1971).

Como cualquier otro cultivo anual, la soja presenta al comienzo una velocidad reducida de acumulación de materia seca, paralela a una menor absorción de nutrientes, en el siguiente período entre 30 a 60 días después de la siembra, el desarrollo y la absorción de nutrientes aumenta exponencialmente o al menos con una máxima velocidad, normalmente limitada por la concentración de nutrientes disponibles en el suelo.

Al final del estadio siguiente ocurre la segunda inflexión con una caída considerable en la elaboración de compuestos producidos por la fotosíntesis. Este estadio es coincidente con el llenado de granos en las vainas. En la fase



siguiente, ya para completar el ciclo y comienzo de la madurez, la velocidad de todos los parámetros disminuye sensiblemente.

En un estudio, Sfredo, citado por Borkert *et al.* (1994), encontró que el orden (decreciente) en las exigencias nutricionales de la soja es de N, K, Ca, Mg, P, la máxima velocidad de acumulación de los nutrientes se observó entre los 82 y 92 días desde la emergencia y el período de mayor tasa de absorción de los macronutrientes fue entre los 39 y 58 días, indicando que entre los 20 y 39 días, se absorbe el 50% de la cantidad total de nutrientes.

### **3.10. Absorción y exportación de nutrientes**

Existe una gran diversidad de datos publicados sobre absorción de nutrientes por el cultivo y exportación de estos en el grano de soja. Dado que las estimaciones surgen de llevar a una hectárea las observaciones realizadas en unas pocas plantas, es natural que las variaciones de densidad de plantas, el índice de cosecha (relación entre la producción de grano y la biomasa aérea total) resultado de las condiciones ambientales del experimento, resulten en una gran variación entre las estimaciones de los autores. La tabla 3.2 muestra una breve selección de datos.

Se observa en cambio, una mayor uniformidad en los datos considerados de exportación de nutrientes por tonelada de granos. Si bien datos de extracción y remoción de P en la planta y en el grano, muy difundidas, indican valores de 8 y 7 kg por tonelada de grano respectivamente, datos de Mascarenhas *et al.* (1992) y otros autores de la región sugieren valores bastante menores (Tabla 3.3). A los fines de cálculos de balance de nutrientes puede considerarse una media de 53 kg de N, 5 kg de P, 16 kg de K y 3 kg de S exportados por cada tonelada de grano producido.

**Tabla 3.2.** Absorción de nutrientes para la producción de una tonelada de soja.

Indicador	Autores			
	Bataglia y Mascarenhas (1982)	Flannery (1986)	Osaki <i>et al.</i> (1991)	Tanaka <i>et al.</i> (1993)
	..... <i>mt ha<sup>-1</sup></i> .....			
MS total	5.6	18.6	11.5	18.8
Rinde de granos	2.4	6.8	5.3	3.1
	.....%.....			
Índice de cosecha	42.8	36.5	46	16.5
	..... <i>kg absorbidos mt granos<sup>-1</sup></i> .....			
N	75.4	81.5	70	161.9
P	5.4	8.1	11.7	15.5
K	31.2	54.5	36.4	110.6
Ca	21.2	27.2	16.8	50
Mg	10.8	9.3	7.7	23.2
S	2.9	4.6	-	12.3
	..... <i>g absorbidos mt granos<sup>-1</sup></i> .....			
B	78.7	-	-	-
Cu	26.7	-	-	27.7
Fe	46.5	-	-	1.470
Mn	130	-	-	260
Mo	5.4	-	-	-
Zn	60.4			112.9

**Tabla 3.3.** Exportación de nutrientes para la producción de una tonelada de soja.

Nutrientes	Flannery, (1989)	Yamada (1)(1999)	Melgar <i>et al.</i> (2)(2003)	Bundy y Oplinger (1984)	Tanaka <i>et al.</i> (1993)	EMBRAPA, (1998)
..... $kg\ m^{-1}$ de granos. ....						
N	51	51	49	58.5	58.8	51
P	6.4	5.4	4.1	6	5.2	4.3
K	14.4	11.2	14	17.9	18.7	16.6
Ca	2.5	2.3	3.9	1.9	1.9	3
Mg	2.5	2.5	2.2	2.4	2.3	2
S	2.4	3.4	1.3	3.1	3.2	5.4
..... $g\ m^{-1}$ de granos.....						
B	24	34	34	26	-	20
Cu	10	15	13	10	15	10
Fe	-	106	155	-	219	70
Mn	18	21	27	25	28	30
Mo	-	4	3	-	-	5
Zn	37	47	42	41	30	40

- (1) Media de 18 muestras provenientes de los Estados de Paraná y Minas Gerais, 1997/98 citadas por T. Yamada (1999).
- (2) Media de 46 muestras provenientes de regiones productoras de la región Pampeana compiladas por los Ing. Luis Gaspar y Wenceslao Tejerina (Melgar *et al.*, 2003).

## **4. Nutrición - Fertilización para mayor productividad y calidad**

### **4.1. Fertilización y manejo del suelo en regiones de Latinoamérica**

#### 4.1.1. Prácticas de siembra directa

##### *Avance en la región*

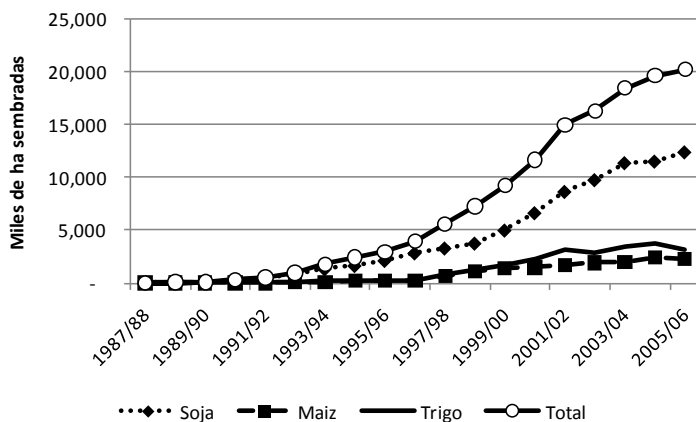
La siembra directa (SD) y en particular de la soja, es la práctica que revolucionó la agricultura de la región en los últimos veinte años, junto con la liberación de las variedades de soja genéticamente modificadas, resistentes al glifosato. La soja es el cultivo que más y más tempranamente adoptó la siembra directa en Latinoamérica. Se propuso, desde el inicio, pensada como una práctica conservacionista para disminuir la erosión en áreas susceptibles, pero una gran parte del impulso inicial en su adopción fue motivada por razones económicas, para lograr un menor gasto de combustible en labranzas.

El gran factor impulsor de la práctica fue el abaratamiento del glifosato, a raíz de la finalización del periodo de protección de la patente en 2001. Toda la tecnología de control de malezas hasta el momento, que incluían varios caldos de herbicidas pre y post emergentes, fue reemplazada por el glifosato, el que usado además de la limpieza inicial, previa a la siembra directa, permite una o más aplicaciones post emergentes. Esta simpleza de operación permitió liberar recursos y la atención de productores, asesores e investigadores del área de control de malezas para reparar en la nutrición del cultivo y dedicar recursos de investigación y favorecer la adopción de tecnologías de fertilización.

La secuencia de cambios avanzó acompañada por la industria metalmeccánica al adaptar las sembradoras, tanto de grano grueso como fino, a la siembra directa y fertilización simultánea. La capacidad instalada de Brasil y de Argentina rápidamente generó el suficiente número de equipos para abastecer la creciente demanda. El desarrollo de cada vez mejores máquinas sembradoras por fabricantes de estos dos países, han tenido un enorme impacto en la adopción por los productores mecanizados en Sudamérica. Estas ganancias tecnológicas y el acceso al conocimiento de los métodos de siembra directa facilitaron enormemente la adopción extensiva del sistema en toda la región.

En Sudamérica, las primeras experiencias con siembra directa o cultivos sin labranza comenzaron por grupos independientes de investigadores en Brasil y en Argentina, en los primeros años de la década del setenta. Conocida en Brasil como *plantío direto na palha*, su asociación reportaba unas 25 millones de has

adonde se aplicaba la tecnología en 2005, un 60% del área cultivada y más del 80% en el estado de Paraná, (FEBRAPDP, 2009). En Argentina, la asociación de productores de siembra directa también da un 68% del área agrícola de adopción, con casi 20 millones de hectáreas en 2005 (Fig. 4.1) (AAPRESID, 2009). En Paraguay se registran porcentajes similares de adopción con 65% del área sembrada (Derpsch, 2001).



**Fig. 4.1.** Evolución del área con siembra directa en los principales cultivos en Argentina (AAPRESID, 2009).

Comparado con Sudamérica, la práctica de siembra directa está muy poco difundida en Europa, África y Asia y en muchos países, este sistema de producción sostenible, conservacionista es virtualmente desconocido. Por ejemplo, a pesar de la abundancia de información de la investigación generada en IITA (International Institute of Tropical Agriculture), en Nigeria desde los años setenta, la superficie total bajo siembra directa en África sigue siendo muy pequeña. Según Derpsch, (2001) cerca de 85% del uso práctico de la siembra directa en el mundo ocurre en las Américas.

En Norteamérica, a pesar de décadas de investigación y de experiencia, el sistema de siembra directa todavía no es bien entendido ni aceptado. A pesar de un constante crecimiento, el área bajo siembra directa en Estados Unidos, cubría cerca de 25 millones de ha, cerca del 23% del área total (Derpsch, 2001). Entre 1998 y 2001, las labranzas conservacionistas en soja aumentaron significativamente, llegando hasta el 50% con un 33% del área total de producción de soja en EE.UU. con SD. Desde entonces la adopción tanto de siembra directa y otras prácticas conservacionistas, como de las variedades

genéticamente modificadas, no han parado de crecer, (Nill, 2005). En maíz, en el Corn Belt sólo el 18% cultiva en SD, aunque un gran porcentaje aplica otro tipo de labranza conservacionista y sólo el 30% es labranza convencional (Christensen, 2002).

### *Manejo de la fertilización en siembra directa*

En sus comienzos, el cuestionamiento al manejo de la fertilidad del suelo en sistemas de SD fue intenso, en diversos segmentos de la investigación y de la asistencia técnica. Las preocupaciones iniciales tuvieron que ver, en especial, con la validez de las categorías existentes de análisis de suelos, originalmente diseñadas para labranza convencional, con remoción del suelo; ya sea por: *a*) la viabilidad de los valores críticos de P y K usados; *b*) las técnicas de muestreo para el diagnóstico de fertilización; *c*) el manejo de la estratificación vertical y horizontal; *d*) las técnicas de ubicación del fertilizante y *e*) la corrección de la acidez.

En general los cuestionamientos resultaron sobreestimados. Las particularidades y detalles de las tecnologías existentes de labranza convencional, fueron adecuadamente descriptas y evaluadas, comparándolas con las adaptaciones para siembra directa. Sin grandes diferencias, terminaron sin cambios prácticos en lo operacional. Sumariamente se describen las adaptaciones.

**Niveles críticos de P.** Entre los macronutrientes, el fósforo, debido a su baja movilidad en el suelo y a la susceptibilidad de las reacciones de fijación, ocupó la atención en muchos trabajos relacionados al modo de aplicación (Randall *et al.*, 1997; Borges y Mallarino, 2000; Mallarino, 2001; Zamuner *et al.*, 2004). Se plantea si bajo el sistema de SD a largo plazo, el valor crítico para indicar la probabilidad de respuesta a la fertilización fosfatada es distinto a las calibraciones realizadas en sistema de labranza convencional. Los diferentes pares de datos, usados para la calibración, responden a distintas combinaciones de suelo y ambiente y por lo tanto, es posible que las diferencias sean sutiles como para que reflejen cambios en la práctica. Investigaciones recientes conducidas en Iowa, ilustran que la elección arbitraria de niveles de porcentajes de suficiencia es una práctica cuestionable, debido a que el análisis económico directo no puede aplicarse a rendimientos relativos (Mallarino y Blackmer, 1992).

Dos trabajos conducidos en calibración de P-Bray, en Argentina, revelaron escasas diferencias. El primero se basó en la información publicada hasta 1995, en unos 45 ensayos, cuando la adopción de SD en soja no llegaba al 30% (Melgar *et al.*, 1995). En el segundo caso se trató de una red de ensayos de 31

sitios en la región pampeana, con la totalidad en SD (Echeverría *et al.*, 2003) los valores críticos fueron respectivamente 9 y 11 ppm, para indicar el límite por encima del cual se obtenían respuestas con alta probabilidad. También para trigo y maíz se ha observado que los niveles críticos de P-Bray 1 en el suelo para decidir la fertilización fosfatada de trigo y maíz son similares bajo SD y LC en Buenos Aires (Argentina) y en Uruguay (Calviño *et al.*, 2000; Bordoli *et al.*, 2004; Zamuner *et al.*, 2004).

**Técnicas de muestreo.** Dada la conocida y esperada estratificación de materia orgánica y distribución de raíces en el perfil, se ha sostenido la necesidad de muestrear por separado las capas superiores de las inmediatamente subsuperficiales, siempre en el tradicionalmente llamado horizonte arable. Es decir, se trata de muestrear los primeros 5 cm y la capa entre 5 y 20 o entre 5 y 15 cm. Otras subdivisiones también se han planteado, como 0-10 y 10 a 20 cm. Lógicamente, los primeros centímetros casi siempre tienen más riqueza de nutrientes que los inferiores, pero no es posible uniformizar los criterios de muestreo a niveles tan sutiles. Por ejemplo, se reportan mejores ajustes para la calibración del rendimiento de trigo y el nivel de P-Bray 1 a profundidad de 0-20 cm, que a 0-5 o 5-10 cm (Zamuner *et al.*, 2004). En síntesis, si bajo siembra convencional se recolectaban muestras de la capa de 0 a 20 cm de profundidad, no existe un consenso para la profundidad de muestreo bajo siembra directa, la o las profundidades de los muestreos dependen más de la voluntad del interesado que de criterios establecidos, algunos utilizan dos o tres profundidades, por ejemplo: 0-15 y 15-30 cm o: 0-10, 10-20 y 20-40 cm. (Siqueira *et al.*, 1987; Anghinoni *et al.*, 2003).

**Estratificación vertical y horizontal.** Dada la falta de remoción del suelo y la escasa movilidad del P en el suelo, en cada estación donde se fertiliza con P, queda una franja con más disponibilidad que el área vecina, por la residualidad del fertilizante. Por lo tanto, al no mezclar la capa superficial del suelo con SD, el P residual en las bandas de aplicación de fertilizantes fosfatados genera variabilidad espacial (Kitchen *et al.*, 1990; Anghinoni *et al.*, 2003).

En la estación siguiente, es posible que las nuevas líneas de siembra no coincidan o lo hagan en distinto grado con las de la anterior campaña. Y así sucesivamente en el tiempo. Esa gran variabilidad resultante, implica el planteo estadístico acerca del número de submuestras necesarias para obtener un valor verdadero. Además, es inevitable la subjetividad del muestreo al momento de realizarlo, cuando se ven con claridad los líneas de cultivo; es decir el técnico que realiza el muestreo debe establecer claramente su técnica de muestrear: siempre en la línea o en el entrelíneo o una combinación de lugares adonde muestrear. Esa decisión es subjetiva y no siempre comprendida y puede

conducir a resultados poco útiles o falsamente interpretados. Las recomendaciones técnicas sugieren realizar una gran cantidad de submuestras, más de 20 y totalmente al azar en relación a la posición del líneo viejo (Tyler y Howard, 1991), pero también se dan detalladas recomendaciones (Anghinoni *et al.*, 2003).

**Técnicas de ubicación de fertilizantes.** Siendo la semilla de soja bastante sensible al efecto salino de los fertilizantes, la fertilización en SD provocó cambios en la combinación de estas operaciones conjuntas. Las primeras sembradoras de SD de grano grueso no contaban con dispositivos de aplicación de fertilizantes, pero fueron rápidamente superadas al desarrollarse, con distintos elementos que permitan variar tanto la distancia desde el surco de disposición de las semillas de las del fertilizante, así como la profundidad relativa de éstas.

En los últimos años también se planteó la posibilidad de aplicaciones al voleo de fertilizante fosfatado, como una forma de superar los efectos de estratificación y variabilidad horizontal de P y de K. Las aplicaciones en cobertura total reducirían el impacto de la variabilidad horizontal, pero simultáneamente resultarían en una mayor concentración superficial del P aplicado. En zonas húmedas del cinturón maicero norteamericano, Bordoli y Mallarino (1998) no encontraron diferencias en rendimiento de maíz o soja entre tres métodos de aplicación de P: voleo superficial en otoño y banda profunda a 15-18 cm o superficial a 5 cm a la siembra en primavera. En Uruguay (Bordoli *et al.*, 2004) y en la región pampeana argentina (Bianchini *et al.*, 2003) demostraron que las aplicaciones al voleo de fertilizantes fosfatados antes de la siembra resultan en respuestas similares a las de las aplicaciones en bandas al momento de la siembra, aún en suelos de baja disponibilidad de P extractable. Lo que indicarían que la fijación de P, en capas superficiales del suelo, no sería un proceso de importancia bajo SD en los suelos locales y que las aplicaciones al voleo anticipadas podrían tener ventajas operativas al incrementar la capacidad de trabajo de los equipos y así reducir la variabilidad horizontal. Dada la mayor concentración en superficie de las raicillas de la soja las aplicaciones superficiales al voleo de P, no indicarían diferencias con las aplicaciones en bandas, disminuyendo la posibilidad de estratificación y de variabilidad espacial (Sá, 1999).

Las mismas consideraciones ocurren en investigaciones que implican la aplicación de potasio. A pesar de la estratificación vertical del K en el suelo, después de SD continua, no hubo diferencias significativas entre fertilización superficial, aplicación en bandas profundas o aplicación superficial incorporada con labranzas del fertilizante potásico en soja (Yin y Vyn, 2002).



#### 4.1.2. Cultivos de cobertura en sistemas de siembra directa

En las regiones subtropicales y tropicales, bajo condiciones de inviernos secos y cálidos, así como veranos húmedos, el sistema de siembra directa (SD) con pocos residuos en cobertura no es tan eficiente para el control de la erosión y el mejoramiento de la calidad del suelo, como ocurre en las regiones templadas o frías, donde el invierno hace que se demore la descomposición de los residuos. Mantener el suelo cubierto con residuos vegetales evita el impacto directo de la gota de lluvia, mantiene funcionalidad de la estructura que favorece la infiltración del agua y reduce el volumen y la velocidad de escurrimiento superficial.

Los cultivos de cobertura son una herramienta agronómica ideal porque cumplen el rol de aportar residuos con alta relación C/N, y de reciclar los nutrientes que de otra manera se perderían, y por ende aumentar el potencial de rendimiento del cultivo siguiente, sea soja u otro incluido en la rotación. Distintas especies son usadas como cultivo de cobertura durante el otoño e invierno de las regiones subtropicales y tropicales, de Brasil y Paraguay como antecesoras a la soja, en particular cuando no hay un cultivo otoño invernal de renta como el trigo o la cebada, más común en las regiones sojeras de Argentina y Uruguay.

Los rastrojos o residuos del cultivo de cobertura mantienen la humedad y la temperatura adecuada para la meso y macro-fauna así como la conservación de la materia orgánica del suelo. El mantenimiento de la cobertura sobre el suelo y la producción de una gran cantidad de biomasa en otoño-invierno sigue siendo un desafío para el sistema de SD en regiones tropicales y subtropicales.

Los cultivos de cobertura son sembrados entre dos cultivos de renta que se cosechan, como maíz (de segunda o de zafría) y soja, no son incorporados al suelo (al contrario de los abonos verdes), pastoreados (a diferencia de los verdes) o cosechados. Los residuos de los cultivos de cobertura quedan en la superficie del suelo, liberando los nutrientes contenidos en la biomasa vegetal al descomponerse. Los cultivos de cobertura se han utilizados popularmente para control de la erosión pero toman cada vez más protagonismo en los sistemas de producción de regiones tropicales y subtropicales.

##### *Especies utilizadas*

Las especies más utilizadas como cultivos de cobertura son gramíneas y leguminosas. Las gramíneas más utilizadas son centeno, trigo, cebada, avena, triticale y raigrás. El centeno es la gramínea más tolerante al frío y al estrés hídrico y produce un abundante volumen de residuo que se descompone más

lentamente que el de otras gramíneas de invierno. La avena es otra alternativa interesante como cultivo de cobertura por la disponibilidad de variedades adaptadas a las diferentes zonas de la Región Pampeana. Las leguminosas mejor adaptadas como cultivo de cobertura son las vicias (*V. villosa* y *V. sativa*) y los tréboles (blanco, de olor, de Alejandría y encarnado). La vicia villosa es la leguminosa más resistente al frío mientras que el trébol encarnado acumula N más rápidamente que la vicia villosa y tolera mejor los suelos moderadamente ácidos.

En las zonas más cálidas, las especies más usadas como cultivos de cobertura son principalmente gramíneas, como el mijo perla, mas popularmente conocido como milheto, (*Pennisetum glaucum*), varias especies de *Brachiaria* (*B. brizantha*, *B. ruzizienses*, *B. decumbens*) y avena negra (*A. strigosa*). Entre las leguminosas tropicales, las de la familia de las Fabaceae son las más conocidas, como la mucuna (*M. pruriens*, *M. aterrima*) y feijão de porco, (*Canavalia ensiformis*). También son usadas *Crotalaria* (*C. juncea*) y guandú o frijol de palo (*Cajanus cajan*).

### *Reciclaje de nutrientes*

Uno de los objetivos del uso de las plantas de cobertura es por su gran capacidad en la asimilación de nutrientes y su liberación más adelante para los cultivos subsiguientes. Este mecanismo es suficientemente importante para las estrategias de fertilización, sobre todo para el potasio en el caso de la soja, y del nitrógeno para otros cultivos. Las cantidades recicladas de nutriente por las plantas de cobertura pueden variar desde unos pocos a más de 400 kg ha<sup>-1</sup>, según la especie cultivada, el nivel de fertilidad del suelo, el nutriente y la biomasa total producida (Tabla 4.1). Algunas gramíneas, como el milheto y las *Brachiarias* son capaces de reciclar, en un único ciclo, cantidades muy superiores a las requeridas para la mayoría de los cultivos de interés económico. Las cantidades recicladas de K son normalmente superiores a las de Ca, y éstas a su vez, superiores a las de Mg. Esta relación refleja la concentración proporcional de estos elementos en los tejidos vegetales. La relación (Ca+Mg)/K también varía entre las especies; las gramíneas absorben preferencialmente K en una relación entre 0.2 y 0.4, mientras que las leguminosas presentan en general una relación entre 0.6 y 1.6 (Tabla 4.1).

Parte del potasio absorbido por las plantas de cobertura proviene de las capas subsuperficiales del suelo y aun de formas no intercambiables. Como algunas gramíneas tienen sistemas radiculares más profundos, la estrategia de uso de los cultivos de cobertura, intercalándolos con los de renta, puede ser muy eficiente

para la recuperación de nutrientes lixiviados a profundidades más allá del alcance de las raíces.

**Tabla 4.1.** Producción de biomasa y cantidades totales absorbidas de calcio, magnesio y potasio por plantas de cobertura cultivadas en Brasil (Adaptado de Benites *et al.*, 2010).

Cultivo de cobertura	Biomasa	Total absorbido			Autores
		K	Ca	Mg	
		.....kg ha <sup>-1</sup> .....			
Avena negra	4,390	94			Giacomini <i>et al.</i> (2003)
Vicia	2,660	74			
Nabo forrajero	3,720	89			
Avena negra	10,334	241	81	24	Borkert <i>et al.</i> (2003)
Vicia	5,328	122	56	14	
Guandú	6,105	164	50	16	
Mucuna	5,097	86	60	15	
Tremoço	10,094	194	120	27	
Milheto	10,800	417	76	40	Boer <i>et al.</i> (2007)
Amaranto	2,890	140	58	33	
<i>Eleusine</i> sp.	8,753	176	78	51	
Milheto	6,929	116	29	17	Benites <i>et al.</i> (2009)
<i>B. brizantha</i>	2,624	65	6	7	

Luego de la muerte de las plantas de cobertura, ya sea por la acción de herbicidas, por corte o senescencia natural, ocurre la liberación de los nutrientes contenidos en su biomasa, siendo la velocidad de liberación distinta para cada nutriente. Mientras que el K de los residuos vegetales se libera rápidamente, y casi vuelve totalmente al suelo en forma disponible durante la fase inicial del cultivo siguiente (Giacomini *et al.*, 2003), el Mg y el Ca, se demoran un poco más para estar disponibles (Boer *et al.*, 2008). Este efecto se da en función de la forma en que el K esta presente dentro de los tejidos, es decir, en forma iónica no asociada a ningún componente estructural de las plantas.

Así, a diferencia de lo que ocurre con el Ca y el Mg, la lixiviación del K de los residuos de las plantas de la cobertura no depende de la descomposición de la biomasa. La transferencia del K de los residuos al suelo depende básicamente de las lluvias luego de la muerte de la cobertura. En ausencia de suficientes lluvias para promover la lixiviación del K, no hay liberación de K al suelo (Rosolem *et al.*, 2003). Sin embargo, Calonego *et al.* (2005) demostraron que cantidades significativas de potasio vuelven al suelo por los exudados radicular luego de la desecación química de cobertura, en ausencia de lixiviación por las lluvias.

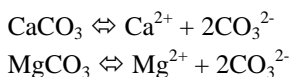
En la práctica, el gran aporte de potasio resultante del reciclaje de las plantas de cobertura no es tomado en cuenta por los agrónomos (Borkert *et al.*, 2003). Aun en vista de las cantidades significativas de K en los residuos y de la alta velocidad de reciclaje, es común el agregado de fertilizantes potásicos en la implantación de cultivos, lo que puede resultar en un factor de desbalance. El momento de uso del fertilizante potásico dentro del sistema de producción debe revisarse para evitar el aumento del nivel de K por encima del recomendable o en su relación con el Mg, y a la mayor posibilidad de pérdida por lixiviación, principalmente en suelos arenosos.

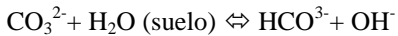
#### 4.1.3. Corrección de la acidez

En gran parte de las regiones productoras de soja de Latinoamérica, notablemente en Brasil y Paraguay, no se concibe la entrada en producción de suelos que no hayan sido previamente corregidos por su acidez tanto en su superficie como en la subsuperficie. Aun así, ya corregidos por encalado y entrados en producción, el tipo de suelos predominante caracterizado por arcillas de baja actividad y baja dotación de cationes de cambio y el clima preponderante, con abundantes precipitaciones favorece una rápida acidificación por lixiviado del Ca y el Mg, haciendo necesario un chequeo periódico de los niveles de acidez y re-encalados o enyesados para corregir la acidez subsuperficial. La necesidad, funciones y beneficios del encalado son descritos por distintos autores, como: Rajj *et al.* (1983), Vitti y Malavolta (1985), ANDA (1987), Malavolta y Santos (1996), Moniz *et al.* (1997), CFSEMG (1999), CFS-RS/SC (1994), Quaggio (2000) y Vitti y Luz (2001).

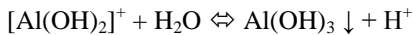
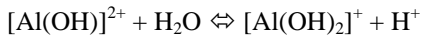
#### *Acidez superficial - Encalado*

La ecuación de la reacción del calcáreo, en el suelo, se resume de la siguiente manera:





De esa forma, los hidroxilos ( $\text{OH}^-$ ) reaccionan con los iones  $\text{H}^+$  de la solución, resultando en agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ). El bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) también reacciona con el  $\text{H}^+$ , formando  $\text{CO}_2$  más agua. Así la reacción continúa en tanto existan iones de hidrógeno en la solución. La neutralización de la acidez del suelo se da simultáneamente con la precipitación del aluminio en solución ( $\text{Al}^{3+}$ ) que es tóxico, transformándose en la forma inerte de hidróxido ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), conforme a las reacciones siguientes:



Neutralización de los  $\text{H}^+$  producidos:



El objetivo de los métodos o criterios utilizados, para corregir la acidez, es predecir la cantidad de calcáreo necesaria para un buen desarrollo de los cultivos y alcanzar el máximo rendimiento económico (cien) o posible. Los principales métodos usados en Brasil y Paraguay son:

- (1) Neutralización del aluminio intercambiable;
- (2) Elevación del tenor de Ca y Mg;
- (3) SMP - elevación a un nivel de pH deseado;
- (4) V% - elevación de la saturación de bases a un valor adecuado.

En el esquema siguiente están resumidos los métodos de determinación de la necesidad de calcáreo (NC), asumiendo un poder relativo de neutralización total del calcáreo o cal agrícola (PRNT) de 100% para la capa de 0 a 20 cm de profundidad.

Cualquier valor calculado debería ajustarse por el verdadero PRNT a usarse.

Criterios para el cálculo de la necesidad de calcáreo (NC) con un PRNT de 100% para la capa de 0 - 20 cm de profundidad.

### 1) Método de neutralización del Al y elevación de los tenores de Ca y Mg

$$1.a) \text{ Minas Gerais. NC (mt ha}^{-1}\text{)} = [(Y \times \text{cmol}_c\text{Al dm}^{-3}) + (X - \text{cmol}_c\text{Ca} + \text{Mg dm}^{-3})]$$

Donde:  $Y=1.0$  (suelos arenosos);  $2.0$  (suelos de textura media);  $3.0$  (suelos arcillosos); y  $4.0$  (suelos arcillosos);  $X=2.0$  (soja)

#### 1.b) Suelos bajo vegetación de Cerrado

Si: a) Arcilla  $>200 \text{ g kg}^{-1}$  y  $\text{Ca} + \text{Mg} < 2.0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3} \rightarrow \text{NC (mt ha}^{-1}\text{)} = 2 \times \text{cmol}_c \text{ Al dm}^{-3} + (2 - \text{cmol}_c \text{ Ca} + \text{Mg dm}^{-3})$

Si: b) Arcilla  $>200 \text{ g kg}^{-1}$  y  $\text{Ca} + \text{Mg} > 2.0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3} \rightarrow \text{NC (mt ha}^{-1}\text{)} = 2 \times \text{cmol}_c \text{ Al dm}^{-3}$

Si: c) Arcilla  $<200 \text{ g kg}^{-1}$  #  $\rightarrow \text{NC (mt ha}^{-1}\text{)} = 2 \times \text{cmol}_c \text{ Al dm}^{-3}$  ó  $\text{NC (mt ha}^{-1}\text{)} = 2 - \text{cmol}_c \text{ Ca} + \text{Mg dm}^{-3}$

# Utilizar la expresión con mayor valor

### 2) Método de tampón SMP

Determina la necesidad de encalado por correlaciones entre el pH, SMP y las cantidades de calcáreo a aplicar, para alcanzar un pH determinado (Tabla 4.2).

### 3) Método de la saturación por bases

$$\text{NC (mt ha}^{-1}\text{)} = (\text{V2} - \text{V1}) \times \text{T } 100^{-1}$$

Donde:  $V1$  = saturación de bases actual del suelo,  $V2$  = saturación de bases deseada (soja=60%), y  $T$  = capacidad de intercambio catiónico del suelo ( $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ).

Referencias: 1.a) CFSEMG, 1999; 1.b) Sousa *et al.*, 1993; 2) CFS-RS/SC 1994; 3) Raij *et al.*, 1996.

**Tabla 4.2.** Recomendaciones de calcáreo para los Estados de Rio Grande do Sul y Santa Catarina, a través del método SMP (CFS-RS/SC, 1994), para soja.

pH SMP	pH deseado (agua)		pH SMP	pH deseado (agua)	
	5.5 <sup>(1)</sup>	6.0		5.5 <sup>(1)</sup>	6.0
	..... <i>mt ha<sup>-1</sup></i> .....			..... <i>mt ha<sup>-1</sup></i> .....	
>4.4	15.0	21.0	5.8	2.3	4.2
4.5	12.5	17.3	5.9	2.0	3.7
4.6	10.9	15.1	6.0	1.6	3.2
4.7	9.6	13.3	6.1	1.3	2.7
4.8	8.5	11.9	6.2	1.0	2.2
4.9	7.7	10.7	6.3	0.8	1.8
5.0	6.6	9.9	6.4	0.6	1.4
5.1	6.0	9.1	6.5	0.4	1.1
5.2	5.3	8.3	6.6	0.2	0.8
5.3	4.8	7.5	6.7	0.0	0.5
5.4	4.2	6.8	6.8	0.0	0.3
5.5	3.7	6.1	6.9	0.0	0.2
5.6	3.2	5.4	7.0	0.0	0.0
5.7	2.8	4.8			

<sup>(1)</sup> Recomendaciones de encalado para pH 5.5 para cultivos en Planossolo.

Ahora bien, ¿cómo se comparan los métodos y criterios en las diferentes condiciones del suelo, clima y variedad? ¿Cuál es el método a aplicar en suelos orgánicos? ¿Cuál es la profundidad de incorporación inicial? ¿Cuánto encalar en suelos de baja capacidad de intercambio catiónico con contenidos de arena entre 70 y 90%? A partir de estas preguntas, surgen algunas limitaciones en los métodos de determinación de la dosis de calcáreo (Tabla 4.3).

**Tabla 4.3.** Limitaciones de métodos de determinación de la dosis de calcáreo.

Método o criterio	Limitación o duda
Neutralización del Al	Los factores incluidos multiplican los resultados y exageran las dosis calculadas)
Contenido de Ca y Mg	Limites arbitrarios, independientes de la CIC y de la relación Ca/Mg en el suelo y necesidad del cultivo
Tampon o SMP	Valores de pH (SMP) basados en pocos ensayos
Saturación de bases	Pocos ensayos que determinen el mejor valor de V%
V %	No considera adecuadamente el contenido de Al y H
Todos	No consieran diferencias varietales, tampoco los límites tóxicos de Al y Mn. No hay ajustes para suelos con CIC <50 y >5 mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>

## ¿Cuándo y cómo realizar el encalado?

### 1. En lotes nuevos, encalar antes de la primera siembra de soja

(a) Anticipación inversamente proporcional al PRNT del calcáreo, es decir cuanto menor calidad tenga el calcáreo, aplicar más anticipadamente.

(b) Al voleo con incorporación lo más profundo posible.

(c) Sugerencia para dosis elevadas: la mitad después del desmonte, incorporándola con arado de disco lo más profundo posible. En tierras ya cultivadas, incorporarlas con arado de disco (Sousa *et al.*, 1993).

### 2. En aquellos lotes con cultivos de soja ya establecidos hay dos opciones:

(a) Aplicar en el área total con incorporación.

(b) Aplicar dosis pequeñas para suministrar Ca y Mg (hasta 500 kg calcáreo ha<sup>-1</sup>) usando la tercera caja en la sembradora y aplicando en el surco de siembra.

### 3. Con respecto al encalado en la siembra directa

(a) Realizarla antes de establecer el sistema de siembra directa, usando la misma metodología del sistema convencional. El encalado previo es un requisito para el éxito del sistema (Demaria, 2000).

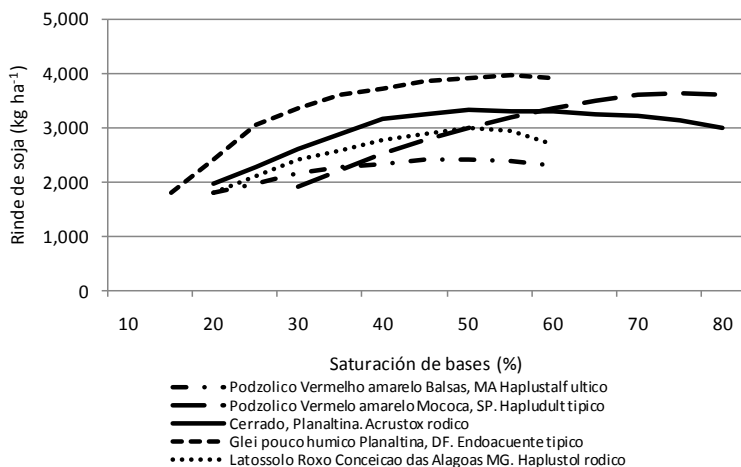
(b) En sistema de siembra directa ya establecida pueden aplicarse en el surco pequeñas cantidades. También puede aplicarse sobre la superficie sin incorporarla. Con el tiempo ocurre un descenso mecánico o “cromatográfico” de calcio y del magnesio hacia las capas inferiores arrastradas por el agua de precipitaciones. Cuanto más fino es el calcáreo, cuanto mayor es la dosis y más arenoso fuera el suelo, mayor la profundidad alcanzada.

La realización del encalado en la línea, consiste en la aplicación de pequeñas cantidades de calcáreo finamente molido (*filler*) en la línea de siembra. Esta forma puede recomendarse como una alternativa para algunos cultivos más sensibles a la acidez (soja, canola, etc.), observándose las siguientes especificaciones técnicas:



- (a) En suelos con elevada acidez (necesidad de encalado  $\geq 7$  mt ha<sup>-1</sup>) y no corregidos, la práctica de aplicación del calcáreo en la línea debe usarse asociada a un encalado parcial: aplicar en toda el área e incorporar al suelo la mitad de la cantidad de correctivo recomendada más el calcáreo *filler* en la línea de siembra, la cantidad sugerida abajo en e);
- (b) Para suelos con necesidad de encalado inferior a 7 mt ha<sup>-1</sup>, la práctica de aplicación de calcáreo en la línea puede ser usada de forma aislada;
- (c) En condiciones de suelos con acidez corregida integralmente, no se recomienda utilizar esa práctica;
- (d) El calcáreo a aplicar en la línea de siembra (tipo *filler*) debe estar finamente molido, con partículas menores a 0,15 mm de diámetro y un PRNT mínimo de 90%;
- (e) En relación a las cantidades a aplicar, se sugieren entre 200 a 300 kg ha<sup>-1</sup>, variando de acuerdo con la relación de precios del insumo y del producto, con las condiciones de acidez y con las facilidades de aplicación.

El encalado proporciona efectos en la física, química, fertilidad del suelo y en la producción de granos. Analizando los resultados que relacionan el rendimiento de soja con la saturación de bases, se verifica que el valor más adecuado para este valor (V) es de alrededor del 50% (Fig. 4.2).



**Fig. 4.2.** Relación entre saturación de bases y rendimiento de soja en varias clases de suelos (simplificado de Sousa *et al.*, 1993 y Cantarella y Quaggio, 2000).

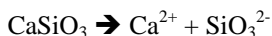
En el suelo existen otros procesos de neutralización sin encalado. Los exudados de las raíces, mezclas de varios ácidos orgánicos (cítrico, málico), fenoles y aminoácidos, realizan un acomplejamiento del Al que, como consecuencia, deja de ser tóxico (Marschner *et al.*, 1995). Asimismo, la descomposición de restos vegetales también causa la liberación de citrato, tartrato, gliconato, los que reducen la toxicidad del Al: (Miyazawa *et al.*, 2000). Como consecuencia de estos procesos toda práctica que implique el uso de abonos verdes, agregado de estiércoles o un sistema de siembra directa prolongado, resulta una menor necesidad de calcáreo.

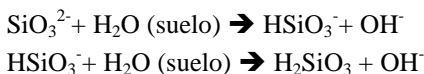


Siendo: M = Ca, Mg, K

$\text{RCOO}^- + \text{Ca, Mg} \rightarrow \text{RCOO Ca, Mg} \rightarrow$  desciende con el agua, efectuando el transporte del calcio y magnesio (Franchini *et al.*, 1999).

La aplicación al suelo de silicatos de calcio y magnesio disminuye la concentración de  $\text{H}^+$  y aumenta el pH (Alcarde, 1992). El ion  $\text{SiO}_3^{2-}$  se hidroliza y genera  $\text{OH}^-$ , los que precipitan al aluminio tóxico y se combinan con el  $\text{H}^+$  para formar agua de la misma forma como ocurre con el calcáreo.





### *Acidez subsuperficial - Enyesado*

El uso del yeso para la corrección de la acidez en el subsuelo, tiene una larga trayectoria en la agricultura de Brasil. En la literatura local se mencionan a varios autores: Pavan (1983), pionero en los estudios sobre yeso, Vittí y Malavolta (1985), Raji *et al.* (1996), Malavolta (1992) y Sousa *et al.*, (1993).

El yeso o sulfato de calcio di hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) es un producto natural encontrado en yacimientos o canteras y también es un subproducto de la industria de los fertilizantes fosfatados al fabricar ácido fosfórico. Posee un 20% de Ca, 16% S (seco) y eventualmente impurezas como arcillas y silicatos.

Su uso está recomendado ante la presencia simultánea de tenores muy altos de Al y bajos de Ca en los horizontes subsuperficiales, ya que el efecto del calcáreo en estas capas adonde no entra en contacto, es menor o más lento.

Distintos autores dan especificaciones y condiciones variadas para generar recomendaciones de uso de yeso agrícola y en la Tabla 4.4 se resumen algunas maneras para cuantificar la necesidad de yeso.

Con respecto a la forma de aplicación, hay coincidencias en recomendar la realización al voleo después del encalado, para evitar el arrastre del par iónico del K y del Mg con el  $\text{SO}_4^{2-}$ . No es necesaria la incorporación. Existen reportes de respuestas significativas del uso del yeso. En el Estado de São Paulo, Brasil, Sfredo y Panizzi (1994), hicieron un estudio sobre la respuesta de la soja al enyesado en cuatro suelos, observándose un incremento en la producción por el agregado del yeso agrícola. (Tabla 4.5).

**Tabla 4.4.** Cálculo de la necesidad de yeso (NY) según varios criterios.

Criterio	Necesidad de Yeso	Observaciones
Ca % CEC <sup>1</sup> <40 o saturación de Al % >20	mt ha <sup>-1</sup> = (0.4xCEC–meq Ca/100 cm <sup>-3</sup> )x2.5	Malavolta (1996)
	mt ha <sup>-1</sup> = (meq Al 100 cm <sup>-3</sup> –0.2CEC) x2.5	NY en mt ha <sup>-1</sup> Máximo por año:1.5 mt ha <sup>-1</sup> suelo arenoso 2.5 mt ha <sup>-1</sup> suelo arcilloso
Ca % CEC entre 60 y 40 % o menor a 45%	= 17.2 + 8.123 arcilla % = 5 x arcilla %	Sousa <i>et al.</i> (1993) Cultivos anuales
saturación de Al % ente 20 y 40% o mayor	= 75 x arcilla % Suelo arenoso = 700 kg ha <sup>-1</sup> Suelo textura media = 1,200 kg ha <sup>-1</sup> Suelo arcilloso = 2,200 kg ha <sup>-1</sup> Suelo muy arcilloso = 3,200 kg ha <sup>-1</sup>	Cultivos perenes Cultivos anuales Sousa <i>et al.</i> (1993)
Ca ≤4 mmol <sub>c</sub> y Al% >30	mt ha <sup>-1</sup> = 0.00034 – 0.002445X <sup>0.5</sup> + 0,033886X – 0.00176366X <sup>1.5</sup>	Ribeiro <i>et al.</i> (1999) X = % arcilla
Ca <4 mmol <sub>c</sub> y Al% >40	kg ha <sup>-1</sup> = 6 x arcilla (en g kg <sup>-1</sup> )	Raij <i>et al.</i> (1996)

<sup>1</sup>CEC: Capacidad efectiva de cambio, se refiere a suma de bases más aluminio, al pH actual del suelo.

**Tabla 4.5.** Efecto de aplicar yeso en producción de soja en suelos de São Paulo.

Tipo de Suelo	Yeso - 100 kg ha <sup>-1</sup>	Testigo	Diferencia
	..... kg ha <sup>-1</sup> .....		
Latossolo vermelho	1,800	1,320	480
Latossolo vermelho amarelo f. arenosa	1,620	1,260	360
Latossolo vermelho escuro f. arenosa	1,620	1,140	480
Arenito Bauru	1,620	1,260	360

#### 4.1.4. Fertilización y manejo de suelos en Brasil

En Brasil, la mayor parte de los laboratorios expresa la concentración de P o de otros nutrientes en mg por volumen de muestra, dado que no se pesa la muestra a analizar, sino que se toma un volumen equivalente ( $\text{mg dm}^{-3}$  en lugar de  $\text{mg kg}^{-1}$  o ppm). A los fines prácticos no hay grandes diferencias y las calibraciones toman en cuenta esta unidad. También, es común la presentación de rendimientos en términos de sacas o bolsas, de 60 kg, por lo que los rindes a campo oscilan entre 30 a 60 sacas  $\text{ha}^{-1}$ , o 1,800 a 3,600  $\text{kg ha}^{-1}$ .

##### *Práctica actual de la fertilización en Brasil*

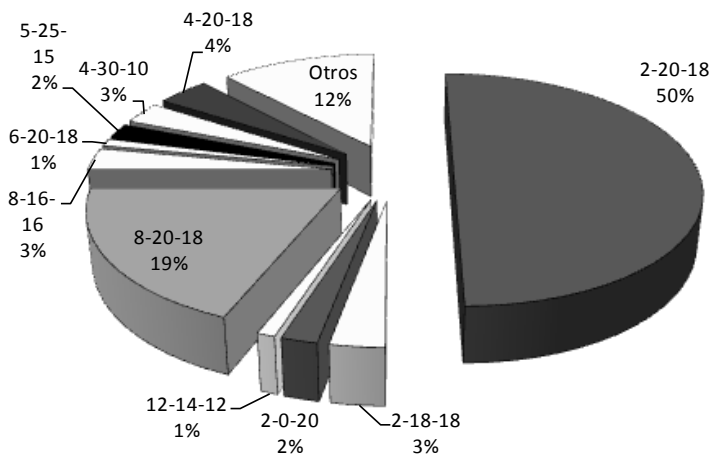
En paralelo con el aumento de los rendimientos medios observados en los últimos años, también hay un aumento en el uso de fertilizantes. Como el consumo de éstos crece a una tasa superior al aumento de la productividad, resulta una reducción en la eficiencia del uso de nutrientes, en especial del potasio.

A pesar de los avances tecnológicos, aún es práctica común la adquisición y uso de fertilizantes sin el debido análisis e interpretación de la fertilidad del suelo. La gran mayoría de los productores no hace un monitoreo anual de la fertilidad de los suelos en sus propiedades y son comunes los casos de productores que realizan el análisis cada 5 años, sólo cuando observan la necesidad de uso de correctores o enmiendas en el área.

Los fertilizantes representan entre el 30 y el 40% de los costos variables de producción de soja en Brasil. En virtud del elevado peso de este insumo en el sistema de producción, muchos productores procuran adquirir anticipadamente los fertilizantes que serán utilizados en la siembra de soja. Entre enero y mayo, cuando los precios históricos tienden a ser inferiores al promedio, período que coincide con el momento de máxima capitalización con la venta de la campaña anterior, son adquiridos cerca de un tercio de los fertilizantes comercializados en Brasil (ANDA, 2009). También es común la asociación de productores para la compra conjunta de fertilizantes.

Tanto en el caso de las compras anticipadas como en las compras conjuntas, normalmente son adquiridas formulaciones estándares NPK, lo que limita el uso balanceado de nutrientes, que respeten las demandas reales del sistema. Según datos relevados de cooperativas de la región central de Brasil, se observa el predominio absoluto de la venta de formulaciones estándares NPK en detrimento de la adquisición de fertilizantes simples. Salvo en regiones donde predominan suelos de textura arenosa (p. ej. al oeste del Estado de Bahia o Sur del Estado de Maranhão), en la mayoría de las regiones de producción de soja

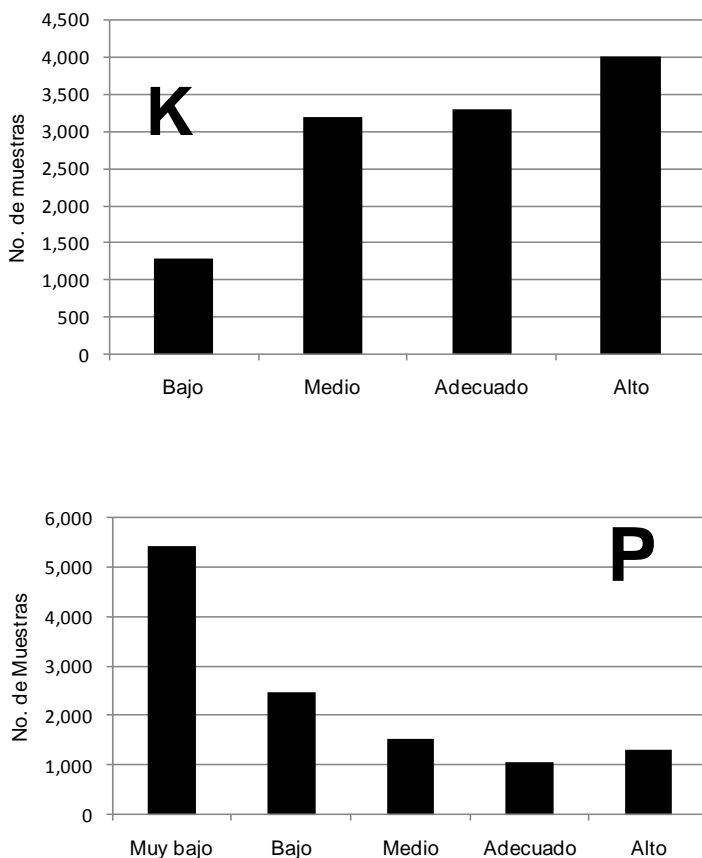
predominan formulaciones con relación P:K cercana a 1, por ejemplo los grados 2-20-18, 2-20-20 o 0-18-18. En algunas cooperativas la venta de formulaciones con esa proporción supera el 60% de todos los fertilizantes comercializado (Fig. 4.3).



**Fig. 4.3.** Distribución de las formulas más comercializadas en 2007/2008 en una cooperativa del centro-oeste de Brasil.

La asociación de K al P en la siembra, aun es la práctica corriente en varias localidades de Brasil. El nivel tecnológico del productor se define comúnmente por la cantidad de fertilizante N-P-K que utiliza en su siembra. Normalmente se considera productores de baja tecnología a aquellos que usan cantidades inferiores a 300 kg ha<sup>-1</sup> de formulación 2-20-18, mientras que en el otro extremo se encuentran productores que utilizan cantidades superiores a 500 kg ha<sup>-1</sup> de la misma fórmula.

Como consecuencia del uso desbalanceado de nutrientes en la soja, los análisis de suelos en la misma región de distribución de fertilizantes, se encuentran con elevados niveles de potasio y con bajos niveles de fósforo (Fig. 4.4).



**Fig. 4.4.** Distribución de frecuencias de niveles de fósforo y de potasio en muestras de suelos en la región del centro-oeste de Brasil (n=11,800).

En las regiones de la frontera agrícola y en suelos de textura arenosa, se observa con mayor frecuencia el uso de fertilizantes fosfatados simples a la siembra y la fertilización potásica con KCl en cobertura, fraccionado o no. El rechazo al uso de formulaciones NPK ricas en potasio, en áreas arenosas, se debe a los problemas de quema de raíces por la salinidad causada por el KCl a las dosis de uso corriente. El aumento de la utilización de fertilizantes simples también es una tendencia cuando se considera la expansión de la agricultura de precisión en las áreas de soja. Pero aun con la adopción de técnicas de agricultura de

precisión, todavía es ampliamente utilizada la aplicación de formulas NPK al voleo a dosis variables

*Recomendaciones oficiales para la fertilización del cultivo de soja*

*Región de Cerrados*

En la Tabla 4.6 se presentan los parámetros utilizados para la interpretación del análisis de suelo para fósforo en regiones bajo vegetación de cerrado. La recomendación de fertilización correctora se basa en la concentración del elemento en el suelo y su tenor de arcilla (Tabla 4.7), usando fuentes solubles. Cuando el tenor de P estuviera en el nivel considerado medio o bueno, se indica la fertilización de manutención de 20 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por cada tonelada de grano a producir.

**Tabla 4.6.** Interpretación del análisis de suelo para recomendación de fertilización fosfatada (Souza *et al.*, 1997).

Clase de Interpretación	Arcilla (%)			
	61-80	41-60	21-40	<20
	..... <i>P – Mellich 1 (mg dm<sup>-3</sup> o ppm)</i> .....			
Muy bajo	0-1.1	0-3.0	0-5.0	0-6.0
Bajo	1.1-2.0	3.1-6.0	5.1-10.0	6.1-12.0
Medio	2.1-3.0	6.1-8.0	10.1-14.0	12.1-18.0
Bueno	>3.0	>8.0	>14.0	>18.0

**Tabla 4.7.** Recomendación de fertilización fosfatada correctora, al voleo y de corrección gradual en la línea de siembra, de acuerdo con la clase de disponibilidad de P y del tenor de arcilla.

Arcilla	Corrección total		Corrección gradual	
	P muy bajo	P bajo	P muy bajo	P bajo
%	..... <i>kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup></i> .....			
61-80	240	120	100	90
41-60	180	90	90	80
21-40	120	60	80	70
<20	100	50	70	60



En la Tabla 4.8 se presentan los valores de referencia utilizados en la interpretación del análisis de suelo para potasio y la recomendación de fertilización en regiones bajo vegetación de cerrado. Cuando el nivel de K extractable está por encima del valor crítico ( $50 \text{ mg dm}^{-3}$ ), se indica la fertilización de mantenimiento de 20 kg de  $\text{K}_2\text{O}$  por cada tonelada de grano a producir.

**Tabla 4.8.** Interpretación del análisis de suelo y recomendaciones de fertilización potásica para suelos de Cerrados con más de 20% de arcilla.

Clase de interpretación	Disponibilidad de K		Recomendación de fertilización
	$\text{mg dm}^{-3}$	$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$	$\text{kg K}_2\text{O ha}^{-1}$
Muy bajo	0-25	<0.06	100
Bajo	26-50	0.07-0.13	50
Medio	51-80	0.13-0.20	0
Bueno	>80	>0.20	0

La interpretación de los resultados de los tenores de azufre y de micronutrientes en los suelos de Cerrados para soja, se realiza en función de los límites presentados en la Tabla 4.9; y en la Tabla 4.10 está compilada la recomendación de la dosis de nutriente a aplicar al suelo de acuerdo con la clase de interpretación del análisis de suelo.

**Tabla 4.9.** Límites para la interpretación de tenores de azufre (S) y de micronutrientes en el suelo para cultivos anuales.

Clase de interpretación	Fosfato mono cálcico	Agua caliente	Mehlich 1			
	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	..... $\text{mg dm}^{-3}$ .....					
Bajo	<5	<0.2	<0.4	<1.9	<1.0	<5
Medio	5-10	0.3-0.5	0.5-0.8	2.0-5.0	1.1-1.6	5-10
Alto	>10	>0.5	>0.8	>5.0	>1.6	>10

Micronutrientes: Galvão, 2002. 2. Azufre (S): Sfredo *et al.*, 1986.

**Tabla 4.10.** Recomendación de dosis de azufre y de micronutrientes en el suelo para soja.

Clase	S	B	Cu	Mn	Zn
	..... $kg\ ha^{-1}$ .....				
Bajo	60	1.5	2.5	6	6
Medio	45	1.0	1.5	4	5
Alto	30	0.5	0.5	2	4

*Estado de São Paulo*

Los valores de referencia utilizados para la interpretación del análisis de suelo y la recomendación de fertilización utilizada para el Estado de São Paulo están presentados en la Tabla 4.11 (Mascarenhas y Tanaka, 1996).

**Tabla 4.11.** Fertilización mineral de fósforo y potasio a la siembra para el Estado de São Paulo.

Rinde	P resina, $mg\ dm^{-3}$				K intercambiable, $mmol_c\ dm^{-3}$			
	0-6	7-15	16-40	>40	0-0.7	0.8-1.5	1.6-3.0	>3.0
$mt\ ha^{-1}$	..... $kg\ P_2O_5\ ha^{-1}$ .....				..... $kg\ K_2O\ ha^{-1}$ .....			
1.5-1.9	50	40	30	20	60	40	20	0
2.0-2.4	60	50	40	20	70	50	30	20
2.5-2.9	80	60	40	20	70	50	50	20
3.0-3.4	90	70	50	30	80	60	50	30
3.5-4.0	*	80	50	40	80	60	60	40

\*No es posible obtener ese rendimiento con la aplicación localizada de fosfato en suelos con tenores muy bajos de P.

En recomendaciones de  $K_2O$  por encima de  $50\ kg\ ha^{-1}$ , aplicar la mitad de la dosis en cobertura, principalmente en suelos arenosos, 30 o 40 días después de la germinación, respectivamente para cultivares de ciclos más precoces y más tardíos. Aplicar  $15\ kg\ ha^{-1}$  de S por tonelada de producción esperada. En suelos deficientes en manganeso ( $<1.5\ mg\ dm^{-3}$ ), aplicar  $5\ kg\ ha^{-1}$  de Mn.

Las deficiencias de micronutrientes en la soja son raras en el Estado de São Paulo. Ante la sospecha de su ocurrencia, realizar análisis de suelo y foliar y una

vez constatada la deficiencia, se puede aplicar, con la fertilización de la siembra, las siguientes cantidades: 5 kg ha<sup>-1</sup> de Zn o 2 kg ha<sup>-1</sup> de Cu o 1 kg ha<sup>-1</sup> de B. En la Tabla 4.12 se presentan los contenidos y límites de interpretación de azufre y micronutrientes con el extractante DTPA utilizado en el Estado de São Paulo Rajj *et al.* (1996).

**Tabla 4.12.** Límites para la interpretación de los tenores de azufre (S) y de micronutrientes en el suelo, con el extractante DTPA.

Clase de Interpretación	Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> S	Agua Caliente	DTPA			
		B	Cu	Fe	Mn	Zn
			..... mg dm <sup>-3</sup> .....			
Bajo	<5	<0.2	<0.2	<4	<1.2	<0.5
Medio	5-10	0.21-0.6	0.3-0.8	5-12	1.3-5.0	0.6-1.2
Alto	>10	>0.6	>0.8	>12	>5.0	>1.2

#### *Estados de Rio Grande do Sul y Santa Catarina*

La interpretación de los resultados del análisis de suelo para fósforo, utilizada en los estados de Rio Grande do Sul y Santa Catarina se muestra en la Tabla 4.13 (CFS-RS/SC, 1994). La recomendación de fertilización en función de la disponibilidad de fósforo, sigue en la Tabla 4.14, y para potasio en la Tabla 4.15. Con referencia a los micronutrientes, sólo se ha encontrado respuesta a la aplicación de 8 a 10 g ha<sup>-1</sup> de molibdeno junto con las semillas, en los suelos de São Pedro, Rio Grande do Sul, bajo condiciones de pH bajo, sin deficiencias de calcio o magnesio y con niveles no tóxicos de aluminio y manganeso. En los demás suelos, no ha habido respuesta o no hay datos concluyentes.

**Tabla 4.13.** Interpretación de fósforo Mehlich 1 para distintos tipos de suelos de Rio Grande do Sul y Santa Catarina.

Interpretación de P-Mehlich 1	Clase de suelo (1)					
	1	2	3	4	5	6
	..... $mg\ dm^{-3}$ .....					
Limitante	≥1.0	≥1.5	≥2.0	≥3.0	≥4.0	-
Muy bajo	1.1-2.0	1.6-3.0	2.1-4.0	3.1-6.0	4.1-8.0	-
Bajo	2.1-4.0	3.1-6.0	4.1-9.0	6.1-12.0	8.1-16.0	≤3.0
Medio	4.1-6.0	6.1-9.0	9.1-14.0	12.1-18.0	16.1-24.0	3.1-6.0
Suficiente	>6.0	>9.0	>14	>18.0	>24.0	>6.0
Alto	>8.0	>12.0	>18.0	>24.0	>30.0	-

(1) Clase 1: >55% de arcilla o suelos Erexim, Durox, Vacaria, Santo Ângelo, Aceguá, Pouso Redondo, Boa Vista.

Clase 2: 41 a 55% de arcilla o suelos Passo Fundo franco-arcilloso y arcilloso, Estação, Oásis, Ciríaco, Asociación Ciríaco-Charrua, São Borja, Vila, Farroupilha, Rancho Grande, Içara, etc.

Clase 3: 26 a 40% de arcilla o suelos Passo Fundo franco-arenoso y arenoso, Júlio de Castilhos, São Jerônimo, Alto das Canas, São Gabriel, Canoinhas, Jacinto Machado Lages, etc.

Clase 4: 11 a 25% de arcilla o suelos Cruz Alta, Tupanciretã, Rio Pardo, Camaquã, Bagé, Bexigoso, Pelotas, Santa Maria, Pinheiro, Machado, etc.

Clase 5: 10% de de arcilla o suelos Bom Retiro, Tuia, Vacacaí, etc.

Clase 6: Suelos encharcados (arroz regado por inundación). *Nota:* Considerar como clase 2 a los suelos Ciríaco, Asociación Ciríaco-Charrúa, São Borja, Oásis, Vila Farroupilha etc., que presentan elevado tenor de limo.

**Tabla 4.14.** Recomendación excede fertilización fosfatada de acuerdo con la clase de disponibilidad de P, número de cultivos y tenor de arcilla.

Clases de interpretación de P-Mehlich 1	Tipo de Suelo														
	1			2			3			4			5		
	1°	2°	3°	1°	2°	3°	1°	2°	3°	1°	2°	3°	1°	2°	3°
	..... <i>kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup></i> .....														
Limitante	140	75	50	130	60	40	120	50	40	120	50	40	130	60	40
Muy bajo	105	60	40	95	40	R	85	R	R	85	R	R	95	R	R
Bajo	75	50	R	65	R	R	55	R	R	55	R	R	65	R	R
Medio	50	R	R	40	R	R	30	R	R	30	R	R	40	R	R
Suficiente	30	R	R	20	R	R	20	R	R	20	R	R	20	R	R
Alto	≤20 ≤R R			≤20 ≤R R			≤10 ≤R R			≤10 ≤R R			≤20 ≤R R		
Valor R (reposición):	$<2 \text{ mt ha}^{-1} = 25 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ ; $2\text{-}3 \text{ mt ha}^{-1} = 40 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ ; $>3 \text{ mt ha}^{-1} = 60 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ .														

**Tabla 4.15.** Recomendación de fertilización potásica de acuerdo con la disponibilidad de K en el suelo y número de cultivos.

Clase de interpretación	K – Mehlich 1	Cultivo		
		1°	2°	3°
	<i>mg dm<sup>-3</sup></i>	<i>..... kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>.....</i>		
Limitante	(≤20)	120	70	50
Muy bajo	(21-40)	90	60	R
Bajo	(41-60)	70	50	R
Medio	(61-80)	60	R	R
Suficiente	(81-120)	50	R	R
Alto	(>120)	≤40	≤R	R

Valor R (reposición): <2 mt ha<sup>-1</sup> = 40 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>; 2-3 mt ha<sup>-1</sup> = 65 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>; >3 mt ha<sup>-1</sup> = 90 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>.

*Estado de Minas Gerais*

La interpretación de la disponibilidad de nutrientes en el análisis de suelo utiliza los valores de referencia compilados en la Tabla 4.16 y las dosis recomendadas para fertilización fosfatada y potásica, según la clase de interpretación, se presentan en la Tabla 4.17 (Ribeiro *et al.*, 1999). Para la corrección de la deficiencia de azufre se recomiendan 30 kg ha<sup>-1</sup> de S, aplicados en la línea de siembra.

**Tabla 4.16.** Interpretación de los tenores de fósforo y potasio de suelo para el Estado de Minas Gerais.

Contenido de arcilla	Interpretación				
	Muy bajo	Bajo	Medio	Bueno	Muy bueno
... % ....	..... <i>P- Mehlich 1- mg dm<sup>-3</sup></i> .....				
60-100	≤2.7	2.8-5.4	5.5-8.0	8.1-12.0	>12.0
35-60	≤4.0	4.1-8.0	8.1-12.0	12.1-18.0	>18.0
15-35	≤6.6	6.7-12.0	12.1-20.0	20.1-30.0	>30.0
0-15	≤10.0	10.1-20.0	20.1-30.0	30.1-45.0	>45.0
	..... <i>P Rem. <sup>(1)</sup> - mg dm<sup>-3</sup></i> .....				
0-4	≤3.0	3.1-4.3	4.4-6.0	6.1-9.0	>9.0
4-10	≤4.0	4.1-6.0	6.1-8.3	8.4-12.5	>12.5
10-19	≤6.0	6.1-8.3	8.4-11.4	11.5-17.5	>17.5
19-30	≤8.0	8.1-11.4	11.5-15.8	15.9-24.0	>24.0
30-44	≤11.0	11.1-15.8	15.9-21.8	21.9-33.0	>33.0
44-60	≤15.0	15.1-21.8	21.9-30.0	30.1-45.0	>45.0
	..... <i>K Mehlich 1 - mg dm<sup>-3</sup></i> .....				
	≤15	16-40	41-70	71-120	>120

<sup>(1)</sup>: Fósforo remanente, concentración de fósforo de la solución de equilibrio después de agitar durante 1 hora a TFSA con una solución de CaCl<sub>2</sub> 10 mmol L<sup>-1</sup>, conteniendo 60 mg L<sup>-1</sup> de P, en una relación 1:10.

**Tabla 4.17.** Recomendación de fertilización fosfatada y potásica de acuerdo con la clase de disponibilidad para el Estado de Minas Gerais.

Disponibilidad de fósforo			Disponibilidad de potasio		
Baja	Media	Buena	Baja	Media	Buena
..... kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> .....			..... kg K <sub>2</sub> O ha <sup>-1</sup> .....		
120	80	40	120	80	40

#### 4.1.5. Fertilización y manejo de suelos en Argentina

##### *Practica actual de la fertilización en Argentina*

La fertilización de la soja es una práctica de reciente data, que comenzó en los primeros años del siglo XXI. Actualmente el área fertilizada 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 la llamada área Núcleo, en el sur de Santa Fe, Entre Ríos, oeste y norte de Buenos Aires. Entretanto, en el norte 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. Los nutrientes usualmente considerados son el fósforo en primer lugar y el azufre en segundo lugar. No se fertiliza con potasio o micronutrientes salvo excepciones (FAO, 2004).

Estos relevamientos recientes indican que los fosfatos mono y diamónico se usan en alrededor de un 43% del 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, la gran mayoría lo realiza en bandas a la siembra al costado o en la línea de siembra (Fertilizar, 2006). Las dosis promedio de uso de cada fuente indican que la mayoría utilizar alrededor de 32 a 34 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>, siendo el uso ponderado de 27 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, o 11.6 kg ha<sup>-1</sup> de P, lo que para un rendimiento medio nacional de 2.9 mt ha<sup>-1</sup> apenas equilibra las cantidades extraídas, según la cifra de extracción por mt que se tome de la tabla 3.3.

Un factor de peso importante, sobre todo en Argentina es la gran proporción de agricultura en campos arrendados, que en conjunto comprende aproximadamente el 50% del área agrícola (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 insumos, de modo de 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.

Los niveles de uso promedio aludidos, que aun algo deficitarios son satisfactorios teniendo en cuenta la larga historia de producción agrícola del país sin usar fertilizantes. Estos han sido apenas rentables en los últimos años. Considerando la relación ilustrada por García (2005), quien recopilando una gran cantidad de ensayos conducidos en la región pampeana entre 1996 y 2004, a los niveles medios de disponibilidad de P del suelo se obtienen entre 10 a 11 kg de soja por kg de P aplicado (Fig. 4.5). Si tomamos los precios corrientes del periodo 2001-2007, en promedio estas relaciones de precios soja/fertilizante, indican que se necesitaron 14 kg de soja para pagar un kg de P (Melgar, 2009).

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, para determinar las cantidades a utilizar en la fertilización de soja y así hacer más eficiente el proceso. En los relevamientos mencionados 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).

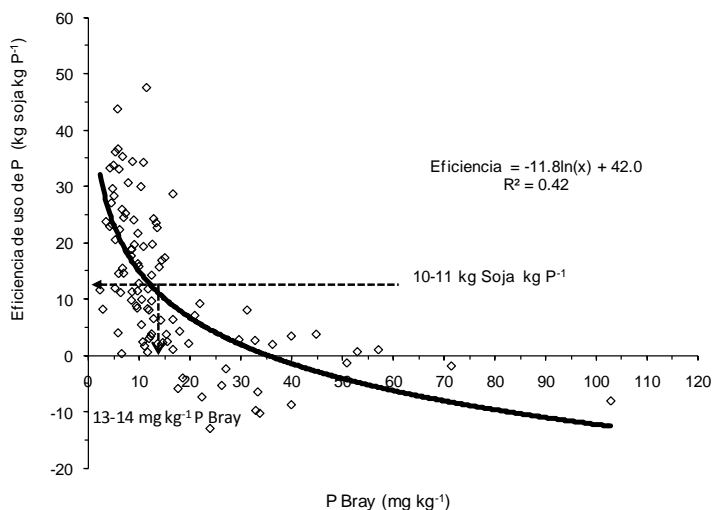
Además, de elegir la dosis, los productores consideran un conjunto de factores para definir la fertilización que son: la disponibilidad del producto formulado y la forma de aplicación del fertilizante fosfatado a la siembra (o al voleo).

Además del valor del análisis para definir la dosis, los productores toman en cuenta su experiencia anterior, valores probables de residualidad, dosis de costumbre que le han resultado desde hace tiempo y también las relaciones de precios, con aplicaciones más liberales ante precios de grano más generosos o a mejores expectativas a cosecha.

### *Fertilización fosfatada*

Los criterios más ampliamente usados son de dos clases, el de suficiencia y el de reposición. Con el primero, se procura fertilizar con la posibilidad de obtener una respuesta económica cuando el nivel de P disponible del suelo es inferior a un denominado nivel crítico, que varía según el extractante o el método usado para su determinación. En Argentina, éste es casi extensivamente Bray 1, o Bray-Kurtz, mientras que en Brasil y Paraguay es Mehlich 1 o doble ácido o el de resinas de intercambio, en el estado de São Paulo (Brasil).

**Criterio de suficiencia y nivel crítico.** La mayoría de las investigaciones para validar el análisis de suelos como herramienta útil para predecir las necesidades nutricionales de los cultivos, ha sido sobre la base del concepto de suficiencia. Este concepto 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: segura, posible e improbable.

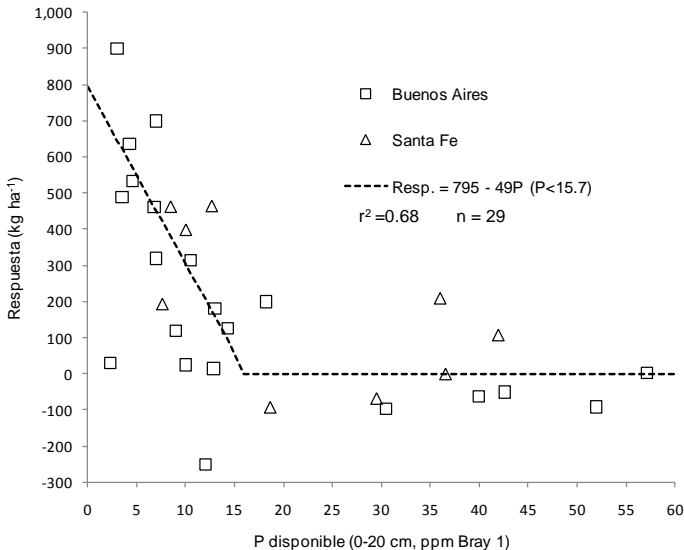


**Fig. 4.5.** Relación entre eficiencia de uso de fósforo y nivel de P-Bray disponible en el suelo a la siembra. Resumen de 101 ensayos conducidos por INTA, Proyecto INTA Fertilizar, FA-UBA, FCA-UNER y CREA, sur de Santa Fe (García, 2005).

Se han establecido tablas de recomendación para la región pampeana argentina en base a la calibración de un gran número de ensayos de campo conducidos en la región y donde el P se evaluó con el método de Bray 1. La primera calibración fue realizada en 2002, con 31 ensayos conducidos en campos de productores de las provincias de Buenos Aires y Santa Fe, de una red mayor, de donde surgió un modelo de respuesta (Fig. 4.6). De acuerdo con la función que describe el modelo, la respuesta aumenta en 50 kg ha<sup>-1</sup> de soja por cada ppm de P que baja desde 16 ppm. Por encima de 16 ppm la respuesta esperada es cero. Así, por ejemplo, es esperable obtener una respuesta del orden de los 200 kg ha<sup>-1</sup> en suelos con 12 ppm de P. Esta función permite determinar fácilmente el nivel de P de suelo por debajo del cual la respuesta esperada es superior al costo de la fertilización. Por ejemplo, si se necesitan 150 kg de soja para pagar una

fertilización fosforada sería recomendable fertilizar suelos que tengan menos de 13 ppm de P (Echeverría *et al.*, 2003).

Para el mismo grupo de datos se ajustó una curva relacionando el rendimiento relativo (% del rendimiento máximo) con el contenido de P del suelo. De acuerdo con esta función se logra un rendimiento relativo del 90-95% con niveles de P del suelo de 8-13 ppm. Por encima de este rango de disponibilidad (>13ppm), la probabilidad de respuesta es muy baja y se considera que la disponibilidad del nutriente para el cultivo de soja es mayor. Por debajo del rango medio (<8ppm), la probabilidad de respuesta a la fertilización es alta y se considera que la disponibilidad de P para la soja es baja (Tabla 4.18). Dentro de este rango medio de disponibilidad se encuentran los valores críticos encontrados en otros trabajos de recopilación realizados en la región pampeana. Melgar *et al.* (1995) señalaron que había una gran probabilidad de respuesta cuando los niveles de P eran inferiores a 9 ppm. En ensayos realizados en Vertisoles, de Entre Ríos, se observó que se alcanza el 95% del rendimiento máximo cuando el suelo tiene 9,5 ppm de P (Barbagelata *et al.*, 2000). Para el sudeste de la provincia de Buenos Aires, se propuso como disponibilidad media de P el rango 8-11 ppm (Echeverría y García, 1998).



**Fig. 4.6.** Respuesta del cultivo de soja al agregado de 20 kg ha<sup>-1</sup> de P a la siembra, en función del nivel de P disponible en el suelo (Bray 1, 0-20 cm) (Echeverría *et al.*, 2003).

**Tabla 4.18.** Clases de disponibilidad de P de suelo (Bray 1) para la soja en Argentina (Echeverría *et al.*, 2003).

Disponibilidad	Clase de interpretación				
	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
	..... $mg\ kg^{-1}$ .....				
P Bray 1 (0-20 cm)	>3.5	3.6-8.0	8.1-13.0	13.1-9.0	<19.0
	..... % .....				
Rendimiento relativo	>80	80-90	90-95	95-98	<98

Si se compara este rango medio de disponibilidad de P con los obtenidos en el medio-oeste norteamericano, se observa que es similar o ligeramente inferior. Así, los rangos de disponibilidad de P para Minnesota, van de 16 a 20 ppm (Rehm *et al.*, 1994), para Iowa de 16 a 20 ppm (Voss *et al.*, 1999) y para Illinois, de 15 a 20 ppm (Hoefy y Peck, 2001). Dentro del rango medio, en general la recomendación de fertilización tiene por objetivo mantener el nivel de disponibilidad de P del suelo (dosis de mantenimiento). El límite inferior de este rango es el que en general se considera como valor crítico de disponibilidad por debajo del cual la probabilidad de respuesta es mayor.

Considerando sólo los cultivos en siembra directa, el nivel crítico encontrado en 21 ensayos conducidos en Iowa es similar a los de la tabla 4.19. En estos ensayos la aplicación de fertilizante fosfatado aumentó los rendimientos de soja entre 1.8 a 4.3  $mt\ ha^{-1}$ , cuando los niveles de P del suelo fueron menores a 9 ppm para la profundidad de 0 a 15 cm (Borges y Mallarino, 2000).

**Criterio de reposición.** La 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. 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.

Ha sido repetidamente demostrado que la continua extracción sin reposición de un nutriente determinado, causa en el mediano plazo el descenso de la disponibilidad de este nutriente. A modo de ejemplo citamos un trabajo de larga duración realizado en Molisoles franco arcillosos de Minnesota, adonde se cultivó maíz continuo por 8 años y luego, alternadamente, soja y maíz por 12 años adicionales; éstos fueron fertilizados anualmente durante los primeros doce años con 0, 20 y 40 kg ha<sup>-1</sup> de P como SFT al voleo, y luego dejados por otros ocho años más sin agregar fertilizantes. Como fue de esperar, los niveles aumentaron durante los 12 primeros años desde un nivel inicial de 22 ppm (Bray 1) a razón de 0.4 y 1.9 ppm año<sup>-1</sup> en uno y 0.7 y 2.5 ppm año<sup>-1</sup> en el otro suelo, éste último más arenoso, hasta alcanzar 40 ppm. Luego, con el avance del tiempo y la extracción por los sucesivos cultivos de soja y maíz en el periodo de 8 años sin fertilizar, comenzaron a decrecer los niveles de P. La rapidez de la disminución varió desde 3.3 ppm año<sup>-1</sup> hasta 0.4 ppm año<sup>-1</sup>, según fue el valor inicial de P-Bray. Además del efecto sobre el suelo, los cultivos respondieron a los tratamientos de fertilización. Se observaron las mismas relaciones entre el manejo y la dinámica del potasio del suelo (Randall *et al.*, 1997).

Normalmente el criterio de reposición está invariablemente asociado al nivel de rendimientos. Es probable que no haya un indicador más sensible para realizar recomendaciones de fertilización que el rendimiento esperado de un cultivo. Este está relacionado en forma directa con la condición agro-ecológica del lugar, el nivel tecnológico empleado e integra el contexto socioeconómico en que se desenvuelve. Además, estimula el sentido común al asociar en la mente del agrónomo, el concepto de balance entre lo que ofrece el suelo y el ambiente en general con lo que demanda el cultivo. Por ejemplo: un ambiente de bajas precipitaciones o irregulares, donde el riesgo de sequía es alto, no propicia una fertilización con altas dosis. Un contexto de bajos rendimientos, con suelos degradados, limitantes edáficos o restricciones de acceso a los fertilizantes o al crédito sólo amerita una fertilización mínima. Por el contrario, productores de alto nivel tecnológico, con riego complementario y un historial de récord de productividad y de aplicaciones de fertilizantes, suponen al menos la necesidad de sostener dichos rindes y por lo tanto las dosis a recomendar deberán ser más altas que el promedio. En la tabla 4.19 se muestra una recomendación para soja basada en una combinación de datos de análisis de suelo y nivel de rendimiento (Echeverría y García, 1998).

El rendimiento determina el nivel de absorción y extracción de los distintos elementos; por lo tanto afecta el nivel de reposición de los nutrientes si se siguen los criterios de mantenimiento y reposición. En la tabla 3.3 del capítulo anterior, se indican los valores de distintas fuentes de extracción de P por tonelada de soja (u otros nutrientes). Estas tablas, muy difundidas, tienen como

entrada principal el valor de absorción de cada nutriente por tonelada de rinde esperado, puesto que se confeccionan sobre el principio de que los granos tienen una composición elemental, aproximadamente constante. En la tabla 3.3, el promedio es de 5.2 kg de P por tonelada de grano (4.1 a 6.4). Estos valores se combinan con un índice de cosecha que tiene que ver con el porcentual destinado al grano de todo el absorbido por el cultivo. De este modo, a mayor rendimiento esperado es obvia una mayor extracción y necesidad de reposición. Estas tablas se han confeccionado para todos los nutrientes de cada cultivo.

**Tabla 4.19.** 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 <sup>-1</sup> )				
	>4.0	4.1-6.0	6.1-8.0	8.1-11.0	11.0-16.0
<i>mt ha<sup>-1</sup></i>	.....kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> .....				
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 esta 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”. Esta estrategia conduce a una recomendación mucho más liberal del uso de fertilizantes debido a que no hay un verdadero nivel de corte. 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. Se descuenta así, la capacidad natural de gran parte de los suelos arables de sostener una producción modesta de los cultivos con las reservas de nutrientes minerales.

### *Fertilización azufrada*

En Argentina, el azufre es un elemento infaltable en los programas de fertilización de soja, desde que su deficiencia fue descubierta y su aplicación masivamente adoptada por los productores en la década pasada. En Brasil, en cambio, dada la larga historia de uso de superfosfato simple, los aportes regulares de S fueron determinantes para sostener un nivel suficiente de azufre. Por otra parte, son comunes los suelos con niveles elevados de aluminio en horizontes subsuperficiales. Los que exigen el uso de yeso como enmienda (*gessagem*) es para corregir los niveles de acidez en profundidad supliendo de esta forma los requerimientos de azufre.

Las regiones adonde las respuestas a la fertilización azufrada son más frecuentes, sea en soja o en otros cultivos, son especialmente 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 (en especial soja) y con historia de cultivos de gran producción con fertilización nitrogenada y fosfatada, así como en suelos arenosos de bajo contenido de materia orgánica. Estas respuestas han sido observadas tanto en soja de primera como en soja de segunda, siguiendo al trigo (Martínez y Cordone, 1998; Martínez y Cordone, 2000; Díaz Zorita *et al.*, 2002).

El uso de fertilizantes en Argentina es reciente (FAO, 2004) y en particular en soja fue impulsado por los fertilizantes a base de azufre. La mayor proporción de sitios con respuesta positiva a la fertilización azufrada en soja se han localizado en la región centro sur de Santa Fe y norte de Buenos Aires, precisamente en la principal región de cultivo. En ensayos conducidos en red por el proyecto Fertilizar del INTA (Echeverría *et al.*, 2003), se identificaron uno de cada dos lotes en el centro-sur de Santa Fe y uno de cada cuatro lotes en el centro-norte de Buenos Aires que respondían al agregado de 15 kg ha<sup>-1</sup> de azufre aplicados a la siembra, con respuestas medias de 20 a 25 kg por kg de S.

La Tabla 4.20 resume las respuestas a S observadas en cultivos de soja de primera en distintas redes de ensayos realizadas en los últimos años, compiladas por García (2006). Sobre un total de 142 ensayos, 57 mostraron respuestas significativas a S (40%). Estas varían entre 300 y 800 kg ha<sup>-1</sup> según el sitio. Las dosis de S recomendadas oscilan, según el nivel de rendimiento esperado y la historia agrícola del lote, entre 10 y 15 kg ha<sup>-1</sup> de S en soja de primera y entre 15 y 20 kg ha<sup>-1</sup> de S en aplicaciones en trigo para el doble cultivo trigo/soja. Para costos de S de US \$1 por kg, respuestas superiores a 95 kg ha<sup>-1</sup> de soja serían rentables para dosis de 15 kg ha<sup>-1</sup> de S y considerando un precio de soja de US \$160 por tonelada.

A diferencia de lo que ocurre con el fósforo, no se ha podido establecer un criterio único en el cual basar las recomendaciones de fertilización. 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 a S (Gentiletti y Gutiérrez Boem, 2004).

**Tabla 4.20.** Sitios con respuesta a azufre (S) en distintas redes de ensayos realizadas en los últimos años. (García, 2006).

Zona y campaña	Sitios respuesta/ Total	Autores
Centro-sur de Santa Fe, 2000/01	8/11	Martínez y Cordone, 2003
Región pampeana, 2000/01 y 2001/02	10/47	Díaz Zorita <i>et al.</i> , 2002
Sur de Santa Fe y SE Córdoba 2001/02	1/6	CREA- S de Santa Fe
Córdoba, 2001/02	2/4	Rubione <i>et al.</i> , 2002
S Santa Fe y N Buenos Aires, 2002/03	4/6	Ferraris <i>et al.</i> , 2004
Centro-sur Santa Fe, 2003/04	13/19	Gentiletti y Gutierrez Boem, 2004
Sur de Santa Fe y SE Córdoba, 2003/04	17/44	CREA Sur de Santa Fe
Sur de Santa Fe y SE Córdoba, 2003/04	2/5	CREA-sur de Santa Fe

En general las respuestas a S ocurren, en especial, en suelos con larga historia agrícola bajo labranza convencional y monocultivo de soja, escaso contenido de materia orgánica (MO) y sometidos a procesos de erosión hídrica. También se asigna una elevada expectativa de respuesta a sitios de gran productividad, bajo siembra directa y antecedentes de fertilización con P y N, pero sin azufre aplicado. En su trabajo de tesis Ferraris (2004), en un grupo de sitios de la región sojera, identificó una serie de variables que se relacionaron con la respuesta a azufre, en particular a la relación MO/arcilla y el contenido de S-sulfatos a 60 cm de profundidad. Esta relación tiene sentido biológico ya que S-sulfatos (0-60 cm) expresa la disponibilidad inicial del nutriente en el suelo y la relación MO/arcilla representaría una estimación indirecta de la capacidad para mineralizarlo, teniendo en cuenta que más del 95% del S del suelo se encuentra en forma orgánica y que la arcilla podría ejercer un efecto protector sobre este S orgánico, al impedir o retardar su pasaje a formas disponibles. El mismo autor no pudo identificar ninguna superioridad de un extractante sobre otros para evaluar el nivel de S-SO<sub>4</sub> y su relación a las respuestas obtenidas a la aplicación de S (Ferraris, 2004).

Un factor de importancia, aparte de los ya conocidos errores en el análisis de suelos y las bajas cantidades de S necesarias para cubrir la demanda del cultivo,



es la presencia de sulfatos en el agua de napas superficiales. Algunas redes de ensayos han permitido determinar umbrales críticos de S-sulfatos a 0-20 cm de profundidad en presiembra, con valores generalmente cercanos a 10 ppm de S-sulfatos, por debajo de los cuales la respuesta es muy probable.

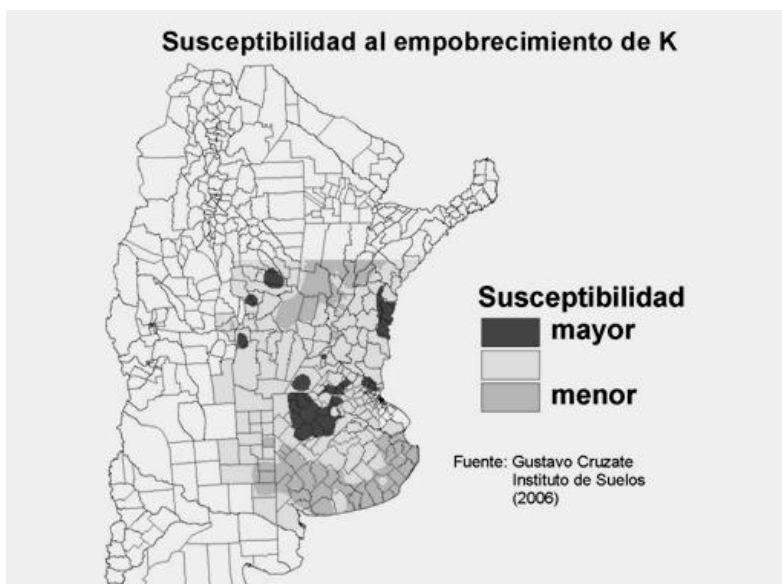
### *Fertilización potásica*

Considerando que en la mayor parte de la región de cultivo de soja en Argentina los niveles de K asimilable son por lejos muy superiores a los publicados en distintas zonas de cultivo, este nutriente no forma parte de los programas de fertilización. Es común encontrar concentraciones de 500 y 600 ppm de K disponible a la siembra en el suelo hasta 20 cm de profundidad. Los umbrales utilizados para la recomendación de fertilización de cultivos de granos varían entre 40 y 270 ppm, dependiendo de la zona, suelo y cultivo (Haby *et al.*, 1990). Específicamente para el cultivo de soja, los servicios de extensión de varias zonas de los Estados Unidos (Nebraska, Minnesota, Michigan, Ohio, Indiana, Iowa, Kansas, Kentucky), no recomiendan fertilizar cuando el nivel de potasio disponible es mayor que 120-200, dependiendo del Estado y del tipo de suelo (Rehm *et al.*, 1994; Vitosh *et al.*, 1995; Voss *et al.*, 1999; Whitney, 1997).

Sin embargo, los elevados rendimientos de los cultivos de soja en la región productora determinan un alto porcentaje de extracción de potasio, que asociado a algunos suelos con menores reservas de minerales potásicos delinea zonas con mayor susceptibilidad de empobrecimiento del suelo (Fig. 4.7, Cruzate y Rivero, 2008). En un estudio conducido en series de suelos representativas de la región, se evaluó el efecto del cultivo sobre el poder regulador de suministro de potasio. Los resultados sugieren un bajo poder regulador y una disminución importante del factor intensidad y cantidad con el laboreo. Esto indicaría que el avance de los años de cultivo resultaría en una potencial deficiencia de potasio para los cultivos (Tabla 4.21, Conti *et al.*, 1993).

**Tabla 4.21.** Disminución de la concentración de K intercambiable en la capa superficial de series de suelos de uso agrícola (Conti *et al.*, 1993).

Serie (Provincia)	Sin cultivar	Cultivado	Descenso
	..... $cmol_c K kg^{-1}$ .....		.... % ...
Ramallo (Buenos Aires)	1.8	1.3	28
Atucha (Buenos Aires)	2.9	1.1	62
Pergamino (Buenos Aires)	1.8	1.6	11
9 de julio (Buenos Aires)	2.6	1.3	50
G. Ordóñez (Córdoba)	3.7	2.3	38
Marcos Juárez (Córdoba)	2.4	1.9	21



**Fig. 4.7.** Susceptibilidad al empobrecimiento de K en la región pampeana, según el balance de los cultivos y el tipo de suelo (Cruzate y Rivero, 2008).

#### 4.1.6. Fertilización y manejo de suelos en Paraguay

Prácticamente la totalidad de la soja se fertiliza en Paraguay. Considerando que la mayor parte de los suelos adonde se cultiva la soja son de escasas reservas minerales (Latosolos o Ultisoles y Oxisoles), es claramente evidente la necesidad de aplicaciones regulares de P y K (Seki, 1999; Amado *et al.*, 2006).

Los recientes experimentos de calibración en siembra directa han indicado que los tenores críticos de P pueden ser mayores a los anteriormente propuestos en labranzas convencionales. Cubilla Andrada (2005) encontró, para suelos del Paraguay con proporciones de arcilla entre 21 a 40%, un nivel crítico de 15 ppm de P-Mehlich 1 y de 12 ppm de P-Mehlich 1 para suelos más arcillosos, entre 41 a 60%, ambos determinados para una profundidad de muestreo de 0 a 10 cm. En este estudio de calibración no diferencian las respuestas del trigo, del maíz o de la soja y el nivel crítico lo define como el nivel de P en el suelo asociado a un rendimiento relativo del 90%. Por ello, en base a estas calibraciones propone recomendaciones de fertilización de varios cultivos que incluyen a la soja según clases de interpretación de niveles de análisis de suelo (Tabla 4.22).

**Tabla 4.22.** Propuesta preliminar de recomendación de fósforo para trigo, maíz y soja en SD en Paraguay según la interpretación de nivel de P-Mehlich (0-10 cm) en dos tipos de suelos (Cubilla Andrada, 2005).

Clase de interpretación	Contenido de arcilla (%)		Cultivo N°		
	40 a 60	20 a 40	1 <sup>er</sup> Cultivo	2 <sup>do</sup> Cultivo	3 <sup>er</sup> Cultivo
	..... <i>P Mehlich 1 - mg kg<sup>-1</sup></i> .....		..... <i>kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></i> .....		
Muy Bajo	>4	>5	100 + M	70 + M	30 + M
Bajo	4-8	5-10	50 + M	30 + M	20 + M
Medio	8-12	10-15	25 + M	M	M
Alto	12-24	15-30	M	M	M
Muy alto	<24	<30	R	R	R

M = Mantenimiento (Extracción + pérdidas): Soja 15 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> mt<sup>-1</sup>; Maíz: 12 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> mt<sup>-1</sup> de granos  
R = Reposición (Extracción de cultivos) - Soja 12 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> mt<sup>-1</sup>; Maíz: 8 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> mt<sup>-1</sup> de granos

### *Fertilización potásica*

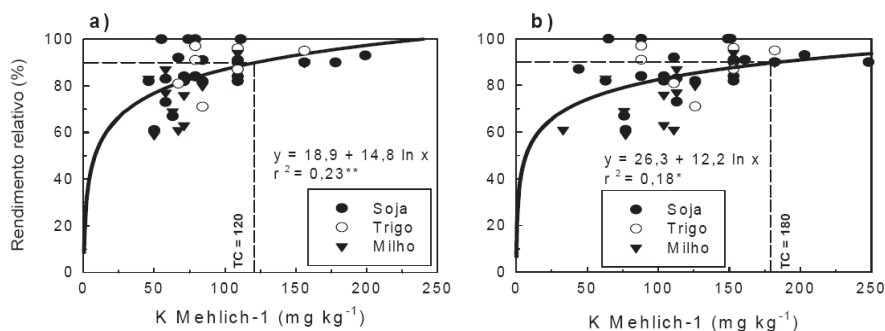
Al igual que con la fertilización fosfatada, los criterios que regulan la fertilización con potasio son el de suficiencia o nivel crítico y el de reposición. Considerando que los suelos usados en la producción de soja (Latosolos u Oxisoles y Ultisoles), de las regiones de cultivo de Paraguay y Brasil son naturalmente pobres en minerales de reserva de K, la necesidad de aplicaciones regulares de fertilizantes es básica para la economía de producción.

El potasio (K) presenta movilidad en el suelo, pudiendo ser redistribuido en el perfil, por el flujo de agua (movilidad vertical) y por absorción y reciclaje por las plantas (movilidad horizontal). Así, la variabilidad vertical y horizontal de los tenores de K, normalmente, es menor que la de P. La continua deposición de residuos en la superficie del suelo en SD, aliado a las reducciones de pérdidas por erosión y lixiviación, inducen a una mayor concentración de K próximo a la superficie del suelo.

Sch lindwein (2003) realizó un trabajo de calibración de los tenores de K en el suelo en SD con 17 diferentes experimentos cultivados con soja, trigo y maíz en RS y encontró un nivel crítico de 120 ppm de K intercambiable, a la profundidad de 0-20 cm. Sin embargo, el tenor crítico fue un 50% superior, cuando el análisis sólo consideró la profundidad de 0-10 cm (Fig. 4.8).

Por otro lado, Wendling (2005), en un estudio de calibración en el Paraguay, reportó un tenor crítico de K (Mehlich 1) de 74 ppm, indicando que la máxima respuesta relativa la obtuvo con un nivel de 150 ppm, a la profundidad de 0 a 10 cm. Asignando una tasa de extracción de 20 kg ha<sup>-1</sup> de K por mt de grano de soja, elabora la tabla 4.23 de recomendación de fertilización potásica según el nivel de K extractable por Mehlich 1 (0 a 10 cm).

Sin embargo, es necesario notar que si bien las tablas de recomendaciones técnicas, sean en base a uno u otro criterio, indican cantidades variables de K<sub>2</sub>O, la realidad es que muchas veces la oferta de fertilizantes es como mezclas físicas de grados de proporciones fijas, tales como 5-30-15, 0-20-10 o parecidas, adonde el aporte de fósforo o de potasio puede ser desbalanceado, según la fertilización se regula con uno u otro nutriente de acuerdo con el producto disponible.



**Fig. 4.8.** Rendimiento relativo de soja, trigo y maíz en sistema de SD, en función del tenor de K Mehlich-1, a la profundidad de a) 0-20 cm, b) 0-10 cm (Schlindwein, 2003).

**Tabla 4.23.** Recomendación de fertilización potásica según clase de disponibilidad de K extractable (Mehlich I) para trigo, maíz y soja bajo siembra directa en Paraguay (Wendling, 2005).

Clase de Interpretación	K -Mehlich 1	Cultivo N°			Total
		1 <sup>er</sup> Cultivo	2 <sup>do</sup> Cultivo	3 <sup>er</sup> Cultivo	
	... mg kg <sup>-1</sup> ...	..... kg ha <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> O.....			
Muy Bajo	>25	150	100	60	310
Bajo	26-50	90	60	40	190
Medio	51-75	60	M	M	60+2M
Alto	76-150	M	M	M	3M
Muy alto	>150	R	R	R	3R

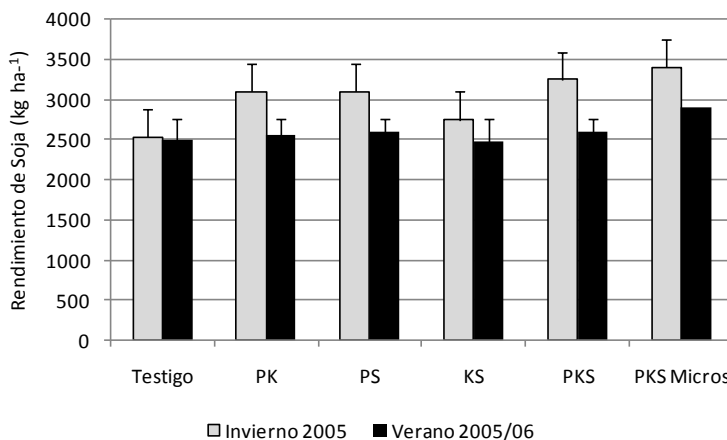
M = Mantenimiento (Extracción del cultivo + pérdidas):

R = Reposición (Extracción de cultivos) - Soja 20 kg K<sub>2</sub>O mt<sup>-1</sup>; Trigo y Maíz: 6 kg de K<sub>2</sub>O mt<sup>-1</sup> de granos

#### 4.1.7. Fertilización y manejo de suelos en Bolivia

En Bolivia, la soja se cultiva en el este, en Santa Cruz de la Sierra, adonde coexisten dos épocas de siembra, la de invierno (abril a junio) y la de verano (octubre a diciembre) o de época, como se explicó en el capítulo 2. Habitualmente la soja no se fertiliza (Taboada, 2006). Entre otras razones por

los altísimos costos de transacción de la economía de Bolivia, que resultan en los fertilizantes más caros de Latinoamérica (FAO, 1999). No obstante se han registrado respuestas similares a las habituales de otras regiones de cultivo, tanto en soja de invierno como de verano en suelos cuyo contenidos de P y de K oscilaron entre 1.8 y 7.8 (P-Olsen) y entre 0.15 y 0.36  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$  (K disponible) (Fig. 4.9, Terrazas y Roca, 2007).



**Fig. 4.9.** Respuesta a tratamientos de fertilización de soja en dos campañas en el Departamento de Santa Cruz, Bolivia. Promedio de seis (Invierno 2005) y cuatro sitios (Verano 2005/06). Fundacruz. (Terrazas y Roca, 2007).

#### 4.1.8. Fertilización y manejo de suelos en Uruguay

La gran mayoría de los cultivos de soja son extensamente fertilizados, dado que los suelos son genéticamente deficientes en fósforo y pobres en minerales de potasio de reserva. El cultivo en el país avanzó de manera significativa desde el 2001, cuando productores provenientes de Argentina comenzaron a sembrarlo extensivamente, motivados por la mejor ecuación económica de producción y aprovechando un desfase en el valor de las tierras agrícolas (Hirschy Ruiz, 2004).

Por esta razón, el sistema de siembra directa y uso de genotipos resistentes al glifosato fue mayoritario. En este sentido los criterios de fertilización fosfatada utilizados son similares a los de Argentina y a diferencia de este país, el uso de potasio es generalizado en los programas de fertilización. Las mezclas físicas

con grados en proporción  $P_2O_5$ :  $K_2O$  igual a 2:1 (tipo 0-30-15) es generalizado junto con el uso directo de superfosfato simple.

Debido a la reciente incorporación del cultivo en el Uruguay, se han iniciado redes de investigación para validar las tecnologías introducidas de Argentina. En particular, los estudios de fertilización con azufre en soja que, abarcaron una red de ensayos en el litoral agrícola, si bien se encontraron efectos en el contenido de S en el grano, se concluyó que la probabilidad de aumentar la productividad del cultivo en suelos medios a buenos, es en general baja. Los estudios de balance de nitrógeno en soja, logrando cuantificar cuánto N proviene del suelo y cuánto aporta la fijación biológica, en comparación con la extracción del cultivo demostraron que el cultivo de soja tiene un balance fuertemente negativo en suelos que tienen una capacidad de aporte de N media a alta (INIA, 2008).

#### **4.2. Síntomas visuales de deficiencias nutricionales en soja**

El diagnóstico visual caracteriza cualitativamente el estado nutricional de las plantas a través de síntomas proveyendo un medio valioso para evaluar las condiciones de un cultivo. Requiere de experiencia ya que los síntomas no siempre son claros y pueden confundirse con facilidad con los de otros problemas fisiológicos, de aplicación de otros agroquímicos o de enfermedades. Los síntomas visuales son la consecuencia de un desorden metabólico y causas distintas pueden provocar síntomas muy parecidos. A veces pueden confundirse con problemas asociados de toxicidad por salinidad, acidez o alcalinidad excesiva. En ocasiones, las deficiencias son inducidas por exceso de la fertilización con otro nutriente o por condiciones climáticas adversas como heladas, encharcamientos temporarios, vientos, falta de luminosidad, suelos compactados, etc. Es una evaluación preliminar y muchas veces sólo es posible confirmarla luego de un análisis químico de los tejidos.

La presencia de síntomas anormales en el cultivo, en las plantas o partes de las plantas es la base de un llamado de atención para cualquier observador atento. En general, si se atribuye la presencia de síntomas visibles a un desorden nutricional, es sin duda relacionado al suministro de los nutrientes del suelo. Por lo tanto, precisará mostrarse con un patrón de distribución similar al del suelo. Éste es el rasgo principal que diferencia los signos de desórdenes nutricionales con los de enfermedades o de otros problemas fisiológicos que pueden suceder en sitios puntuales, afectando a unas pocas plantas.

Puede ocurrir que los síntomas de una determinada deficiencia sean más comunes y fácilmente reconocibles que otros. En general, cuando estos síntomas se presentan en estos cultivos extensivos su corrección es difícil. Rara vez se

observan deficiencias de fósforo o potasio en todos los cultivos ya que el síntoma es más bien vago y no siempre tan bien definido como muestran las fotos. Pero, muchas veces, éste existe y resulta en disminución de rendimientos, lo que ha merecido la expresión de “hambre oculta”. A pesar de generalmente no puede ser identificada visualmente, el “hambre oculta”, que es el principio de la deficiencia del nutriente, con tenores ligeramente abajo de su nivel crítico inferior, causa caídas en los rendimientos de los cultivos. Los síntomas que se describen en general, se presentan cuando las deficiencias son severas. Cuando es leve, las plantas pueden no presentar síntomas pero sufrir una disminución del rendimiento o la calidad del producto.

En la diagnosis visual son importantes las siguientes observaciones: momento del ciclo de cultivo; posiciones de las hojas con problemas, ya que las diferencias en la movilidad de los nutrientes, que presentan características o sintomatologías semejantes, posibilita identificarlos por el estadio de madurez de las hojas; presencia de clorosis o necrosis; inicio de los síntomas en relación a la hoja; crecimiento de los meristemas afectados; tipo de clorosis internerval, etc. Debe tenerse presente que los síntomas de deficiencias nutricionales abarcan en general un área grande y no plantas discretas.

Se han elaborado muchas revisiones y claves sistemáticas para distinguir las deficiencias de los diferentes nutrientes, e indudablemente su mayor valor es cuando están acompañadas de buenas fotografías (Bergmann, 1992). En soja destacamos las elaboradas por el International Plant Nutrition Institute (IPNI), Tanaka *et al.* (1993) y Borkert *et al.* (1994). Detalles y referencias más profundas sobre la manifestación de deficiencias también pueden encontrarse en Mengel y Kirkby (1987). Estas referencias han servido de base para la elaboración de este capítulo.

#### 4.2.1. Macro y meso nutrientes

##### *Nitrógeno*

Por lo general, este síntoma está asociado a fallas en la nodulación. Suelos que con anterioridad no fueron cultivados con soja y donde la semilla no fue inoculada o con baja eficiencia de la fijación de N por causa de problemas de acidez o bajos niveles de fósforo u otro nutriente, afectan la nodulación y resultan en fallas en el suministro de N fijado simbióticamente. Áreas encharcables o inundadas temporariamente, provocan la muerte de los Rhizobios por asfixia radicular y son áreas del cultivo que manifiestan este síntoma. La inversa no siempre es así, pueden producirse fallas en la nodulación por exceso de N disponible en el suelo, que evita que la soja manifieste síntomas de deficiencia de N.



La dinámica de la nodulación implica que por una sequía en la mitad del ciclo puedan perderse muchos nódulos y las plantas previamente bien suplidas con N, se vuelvan deficientes durante el llenado de grano (Perticari, 2004). El cultivo de soja con deficiencia de nitrógeno va perdiendo su color verde oscuro, pasando a verde-pálido con un leve amarillamiento. Posteriormente, todas las hojas se vuelven amarillentas. Este síntoma aparece primero en las hojas inferiores, pero se extiende rápidamente en las hojas superiores. El síntoma aparece, por último, en las hojas nuevas ya que el N es un elemento extremadamente móvil en la planta, siendo translocado desde tejidos maduros a las hojas nuevas. La necrosis de las hojas o partes de la hoja ocurren más bien en etapas tardías y más severas de la deficiencia. En este detalle difieren de la de K y Mg, donde si bien los síntomas también comienzan en las hojas más viejas, las manchas cloróticas y necróticas se localizan y aparecen en una etapa más bien temprana. Los síntomas de deficiencia de Fe, Ca, S son también similares a los de la deficiencia de N, con las hojas caracterizadas por colores amarillentos y verde-pálidos. Pero en estas deficiencias, sin embargo, los síntomas ocurren primero en las hojas más jóvenes.

Foto N° 1. Ver apéndice

### *Fósforo*

Los síntomas de deficiencia de fósforo no siempre son muy bien definidos. Aparecen en hojas maduras, caracterizados por un color verde oscuro con puntuaciones marrones en estadios post floración (Vernetti, 1983). Pero el síntoma principal es un crecimiento lento con plantas pequeñas de hojas de tamaño menor al normal. El sistema radicular es bastante pobre también, evidenciado por el pequeño porte de las plantas de soja debido a una deficiente dotación de fósforo en el suelo. La elevada movilidad del P en la planta, bajo condiciones de deficiencia, provoca translocamiento del elemento desde las hojas más maduras hacia las más jóvenes, agotando las reservas de P de las primeras adonde el síntoma aparece primero (Meurer *et al.*, 1981). Sin embargo la deficiencia de P también puede aparecer en etapas tardías (Rosolem y Tavares, 2006). Al momento de llenado de semillas, las plantas deficientes en P muestran hojas amarillentas con tonos anaranjados o rojizos en el limbo y en los pecíolos. Además, del efecto sobre la planta, el suministro limitado de fósforo reduce el número y la eficiencia de los nódulos y, como consecuencia, la fijación simbiótica de nitrógeno (Sa e Israel, 1991).

Foto N° 2. Ver Apéndice

### *Potasio*

La deficiencia de K no da síntomas visibles en forma inmediata. Estos síntomas comienzan, por lo general, en las hojas más maduras, debido a que por la gran movilidad del potasio, estas hojas lo suministran a las hojas más jóvenes ante condiciones de deficiencia. Al igual que en la mayoría de las especies vegetales la clorosis y la necrosis comienzan en los márgenes y puntas de las hojas. Las plantas deficientes de K muestran una disminución en el turgor y bajo estrés hídrico se vuelven llamativamente flojas, con una baja resistencia a la sequía. Las plantas afectadas muestran una mayor susceptibilidad al daño por heladas, ataques fúngicos y condiciones salinas (Rosolem *et al.*, 1993).

Ante una deficiencia severa, los síntomas visuales comienzan con un moteado amarillento en los ápices y bordes de los folíolos de las hojas adultas, más inferiores de la planta. Estas áreas cloróticas avanzan hacia el centro de las hojas, cuyas áreas más amarillentas en los bordes se necrosan con el aumento progresivo del síntoma. Con el avance del tiempo finalmente, se destruyen las áreas necrosadas, dejando los folíolos con aspecto desflecado (Meurer *et al.*, 1981; Verneti, 1983). Las plantas con deficiencia de potasio producen granos pequeños, arrugados y deformados la madurez de la soja se atrasa, pudiendo causar también tallos verde, retención foliar e formación de frutos partenocápicos (Mascarenhas *et al.*, 1992).

Foto N° 3. Ver Apéndice

### *Azufre*

Los síntomas de deficiencia de azufre son semejantes a los de nitrógeno difiriendo de este último por darse sólo en las hojas más jóvenes debido a su movilidad en los tejidos. El síntoma es una clorosis general de las hojas incluyendo las nervaduras, que de verde-pálido pasan a verde amarillento. Los síntomas comienzan en hojas nuevas, mientras que en la deficiencia de N estos se inician en las hojas maduras. Las hojas nuevas son más pequeñas y tienden a manifestarse con mayor intensidad en estadios avanzados del ciclo, durante el llenado de granos.

No es fácil reconocer los síntomas de deficiencia de azufre cuando se comparan con los síntomas de deficiencia de otros elementos, pero sí pueden confirmarse con un análisis foliar, ya que en las plantas con falta de S, los niveles de S-SO<sub>4</sub> son muy bajos, mientras que el N de amidas y de N-NO<sub>3</sub> se acumulan. Esto contrasta marcadamente con la deficiencia de N donde los niveles de compuestos solubles de N son bajos y los niveles de S-SO<sub>4</sub> son normales. La falta de azufre tiende a ocurrir, con mayor frecuencia, en suelos arenosos,

ácidos, con bajo contenido de materia orgánica o antecedentes de bajos rendimientos. Asimismo, aun cuando no se presenten síntomas visuales, es posible que el hambre oculta de esta deficiencia provoque importantes disminuciones de rendimientos.

Foto N° 4. Ver Apéndice

### *Calcio*

Normalmente esta deficiencia está muy asociada a la acidez excesiva provocada por la toxicidad de aluminio y de manganeso y por lo tanto generan la misma sintomatología, en particular en el sistema radicular. La deficiencia de calcio afecta los puntos de crecimiento, como las yemas apicales de los tallos y raíces, pudiendo provocar la muerte de ellos. La deficiencia normalmente aparece primero en las hojas nuevas y en los puntos de crecimiento (meristema apical), probablemente como consecuencia de la falta de movilidad del calcio en la planta. Los ápices terminales de las hojas primarias se vuelven necróticos y se desarrollan franjas cloróticas estrechas. Las hojas nuevas se enrollan y pueden presentar colapso de los pecíolos. Las hojas primarias se vuelven blandas y flexibles y se caen de la planta. El sistema radicular se presenta de coloración amarillada y poco desarrollado (Mascarenhas *et al.*, 1992; Nelson y Barber, 1964).

### *Magnesio*

De modo similar a la deficiencia de calcio, la de magnesio tiende a ocurrir con más frecuencia en suelos ácidos y arenosos, con bajo tenor de materia orgánica. La deficiencia de magnesio provoca inicialmente una clorosis marginal, bordes de color verde-pálido y luego pasa a una clorosis internerval en las hojas más maduras, que con el tiempo avanza hacia adentro, entre las nervaduras. El amarillamiento comienza por las hojas basales y, con el aumento de los síntomas de deficiencia, las hojas jóvenes también son alcanzadas (baja producción de clorofila en la planta). La movilidad del Mg provoca este orden ascendente de aparición de los síntomas de deficiencia, de la misma forma que el N y el P.

Manchas de óxido y manchas necróticas irregulares pueden aparecer más tarde entre las nervaduras, en la parte superior de la planta. En estadios más avanzados del crecimiento, la deficiencia de Mg da una apariencia de maduración anticipada, con un bronceado de toda la superficie de la hoja. (Verneti, 1983).

Foto N° 5. Ver Apéndice

### *Acidez excesiva. Toxicidad por Aluminio*

El exceso de aluminio en la solución de suelo, inhibe también el crecimiento de la raíz principal y de las secundarias, dejándolas cortas y gruesas, con coloración amorronada. Si bien no es un elemento esencial para el desarrollo de las plantas, la consideración del aluminio en la nutrición es importante debido a su efecto tóxico sobre las plantas en la mayoría de los suelos ácidos. Los síntomas de toxicidad de aluminio en las hojas de soja parecen aquellos de deficiencia de fósforo: las plantas quedan pequeñas, no hay desarrollo normal, las hojas son pequeñas y de color verde-oscuro, amarillamiento y necrosis en las puntas de los folíolos y atraso en la maduración.

La toxicidad de aluminio en soja parece que también provoca deficiencia inducida y transporte reducido del calcio dentro de la planta, causando el encurvamiento y enrollamiento de las hojas nuevas y colapso de los puntos de crecimiento y del pecíolo. Las raíces de soja desarrolladas en suelos con alto contenido de aluminio intercambiable, son característicamente cortas y frágiles. Ocurre un engrosamiento de las puntas de las raíces y de las raíces laterales, que pueden adquirir color marrón. El sistema radicular presenta muchas raíces laterales cortas y gruesas, pero con ramificaciones pequeñas y finas.

#### 4.2.2. Micronutrientes

##### *Boro*

La deficiencia de boro, normalmente, ocurre con mayor frecuencia en suelos arenosos y de regiones más húmedas, asimismo, se asocia a deficiencias de calcio y situaciones de mucha acidez o alta pluviometría, ya que el B disponible se lixivia fácilmente del suelo.

La deficiencia aparece primero como un crecimiento anormal o retardado de los puntos apicales de crecimiento. Las hojas más jóvenes se deforman, arrugan y a veces se vuelven más gruesas y de color azul-verde oscuro aunque más pequeñas; pueden desarrollar clorosis en los bordes e internerval. Las hojas y tallos se vuelven quebradizos y frágiles, aunque con entrenudos engrosados indicando disturbios en la transpiración. A medida que progresa la deficiencia, los puntos terminales de crecimiento mueren, toda la planta se empequeñece y se restringe la formación de flores y vainas.

Si bien la soja se ubica entre las especies medianamente sensibles a la deficiencia de B, es a la vez muy sensible a la alta concentración de boro en los suelos, desarrollando con rapidez síntomas de toxicidad. Estos consisten en un amarillamiento de las puntas de los folíolos seguido de una necrosis progresiva, que comienza en las puntas y en los márgenes, finalmente alcanzando las

nervaduras laterales y centrales. Las hojas adquieren un aspecto de quemadas y caen (Verneti, 1983; Mascarenhas *et al.*, 1988; Rossa *et al.*, 2006).

Foto N° 6. Ver Apéndice

### *Cloro*

La deficiencia de cloro se caracteriza por plantas cloróticas con folíolos que quedan flácidos en los bordes. Sin embargo la toxicidad de cloro es más común que la deficiencia. La soja cultivada en suelos que frecuentemente reciben grandes dosis de fertilizantes a base de cloruros, puede presentar acumulación de estas sales y presentar síntomas de toxicidad de cloro. Estos se manifiestan como quemado de las puntas de las hojas o de sus márgenes, lo que les confiere un tono bronceado, con caída prematura. Cuando ocurren estos síntomas, la gran concentración de cloro en los tejidos foliares se asocia con altos tenores de manganeso, especialmente cuando hay déficit hídricos o una seca antes de la floración (Borkert, *et al.*, 1994).

### *Cobalto*

No hay informes de síntomas de deficiencia de cobalto en cultivos a campo. En plantas de sojas cultivadas en solución nutritiva, los síntomas de deficiencia de cobalto son descritos como clorosis y enrollamiento de las hojas. En cambio, la toxicidad de cobalto fue observada en plántulas de soja al inicio de la germinación, cuando se aplicaron dosis muy altas de Co y Mo junto a las semillas. Los síntomas de toxicidad son manchas necróticas en los cotiledones y hojas con folíolos cloróticos. Este efecto del exceso de cobalto aplicado puede inducir a una deficiencia de hierro. Los síntomas desaparecen después de algunos días, principalmente con buenas condiciones de humedad y con condiciones de rápido desarrollo de las plantas (Borkert *et al.*, 1994).

### *Cobre*

La soja se considera un cultivo de baja respuesta al cobre (Malavolta y Kliemann, 1985) y en general no se han descripto síntomas de deficiencias a campo en Brasil (Tanaka *et al.*, 1993), Argentina u otras regiones productoras, pero se ha reproducido en experimentos en solución nutritiva (Adams *et al.*, 2000). Una de las razones de su ausencia de síntomas es que no se cultiva normalmente en suelos adonde se prevea restricción en el suministro de Cu como ser suelos alcalinos o con alto tenor de materia orgánica.

La deficiencia de cobre generalmente causa necrosis en las puntas de los folíolos de las hojas nuevas. Esa necrosis prosigue por los bordes de los folíolos,

resultando en hojas con apariencia de pérdida de turgidez y de agua, pareciendo que se secan. El crecimiento se retarda y el color de la planta cambia a verde ceniza, verde-azulado u oliváceo (Borkert *et al.*, 1994). También se ha descrito clorosis, muerte apical e internudos cortos entre los síntomas de deficiencia de cobre descriptos (Tanaka *et al.*, 1993).

Entre los síntomas de toxicidad de cobre, provocados con una alta concentración de Cu en solución nutritiva, se describe principalmente clorosis de las hojas, muy semejante a la deficiencia de hierro.

### *Hierro*

La deficiencia de hierro es un factor limitante muy común para cultivos de soja sobre suelos calcáreos con altos pH. En Argentina es fácil encontrarla en áreas de suelos Vertisoles, en Entre Ríos, adonde la inversión de horizontes levanta a la superficie capas con alto contenido de carbonato de calcio o en las regiones productoras del noroeste, con suelos de pH altos. Asimismo se reporta como de común ocurrencia en las Grandes Planicies y en los estados de Centro Norte de EE.UU. (Clark, 1982). Por el contrario, dada la gran concentración de hierro en suelos tropicales (Latosolos, Ultisoles y Oxisoles), la deficiencia de hierro normalmente no ocurre en estos, excepto en situaciones de encalado reciente o con sobredosis de material calcáreo. También, altas concentraciones de aluminio y manganeso en la planta pueden reducir la absorción de hierro e inducir deficiencia de este elemento. Existe una gran diversidad entre variedades en la susceptibilidad a la deficiencia de Fe. Por ello, la selección de variedades adaptadas es la práctica de manejo más importante para productores en suelos afectados.

La deficiencia de Fe es una muy característica clorosis internerval en hojas nuevas y puede causar pérdidas sustanciales de rendimientos en soja (Hansen *et al.*, 2003). A veces la clorosis se desarrolla al comienzo y luego desaparece a medida que la planta madura, pero en casos severos persiste a través del ciclo. La clorosis por lo general ocurre en áreas definidas en manchones en el campo y frecuentemente, pero no siempre, en áreas bajas encharcables.

El síntoma de la clorosis internerval, puede ser confundida con la provocada por otras deficiencias (Adams *et al.*, 2000) y en algunos casos puede distinguirse de la deficiencia de nitrógeno o magnesio por ocurrir la de hierro en hojas más nuevas debido a su menor movilidad en la planta. En estadios iniciales de desarrollo de los síntomas, las áreas entre las nervaduras de los folíolos se vuelven de color amarillento o blanquecino. A medida que avanza la severidad de la deficiencia, también las nervaduras quedan amarillentas y finalmente, toda

la hoja se vuelve blanca. Manchas necróticas de color marrón pueden surgir en los márgenes de los folíolos, próximo a los bordes. En estados más avanzados, el color verde se pierde completamente, inclusive en las nervaduras principales (Meurer *et al.*, 1981).

La toxicidad de hierro puede ocurrir en suelos hidromórficos cuando queden encharcados o inundados por algunas semanas o con gran saturación de agua. En esas condiciones, el tenor de hierro soluble puede aumentar en el suelo desde 0.1 ppm hasta 100 ppm, aumentando la absorción.

Foto N° 7. Ver Apéndice

### *Manganeso*

El síntoma típico de la deficiencia de manganeso es una clorosis estriada de las hojas más jóvenes. La clorosis es más evidente en el espacio entre las nervaduras. Excepto éstas, las hojas se vuelven verde-pálido y pasan a amarillo-pálido. Áreas necróticas marrones se desenvuelven en las hojas a medida que la deficiencia se vuelve más severa. La deficiencia de manganeso puede ocurrir en suelos con bajos niveles de Mn extraíble o con suelos de pH alto. El suministro de Mn es bajo naturalmente en suelos arenosos o mal drenados. La disponibilidad de Mn disminuye significativamente con el aumento de pH. En general, la deficiencia del Mn en soja se espera cuando el suelo pH supera 6.2 en suelos mal drenados y más de 6.5 en suelos mejor drenados. Por esa razón, la deficiencia se observa con frecuencia en suelos encalados recientemente o con dosis elevadas o mal incorporado.

La deficiencia de manganeso difiere de la de hierro y de magnesio porque las nervaduras permanecen verdes y aparecen resaltadas, de forma saliente. También en la deficiencia de Mn, los síntomas son visibles primero en las hojas nuevas, en tanto en la de Mg las hojas maduras son las primeras en ser afectadas (Adams *et al.*, 2000). A veces las hojas desarrolladas durante una etapa del ciclo manifiestan deficiencia y mantienen los síntomas, mientras que otras hojas que se desarrollan después, en estadios fisiológicos más avanzados, pueden tener apariencia de hojas saludables, sin el problema. Esto puede ocurrir debido al cambio de condiciones climáticas o porque las raíces crecieron en un horizonte más profundo y ácido, con mayor disponibilidad de Mn. Esto ocurre a veces cuando el calcáreo se incorpora a poca profundidad, con pH altos (más de 7.0) entre 5 y 10 cm (Borkert *et al.*, 1994).

En muchos suelos ácidos es más común la ocurrencia de toxicidad de manganeso que la deficiencia. La toxicidad se caracteriza inicialmente por el arrugamiento y enrollamiento de las hojas debido al pequeño desenvolvimiento

de las márgenes y por la presencia de puntos necróticos. También se describe una clorosis en las bordes de los folíolos seguida de necrosis y clorosis de las hojas nuevas (semejante a la deficiencia de hierro).

Foto N° 8. Ver Apéndice

### *Molibdeno*

Dado que la solubilidad y disponibilidad del Mo en el suelo disminuye con el aumento de la acidez, la deficiencia puede ser eliminada por el encalado, siempre que haya molibdeno en este suelo en forma inmovilizada por la acidez. También es posible tener síntomas de deficiencia, si las semillas de soja usadas en la siembra fueron producidas en un suelo con baja disponibilidad de Mo. En cambio, si estas semillas provienen de cultivos de soja pulverizada con abonos foliares conteniendo Mo durante el llenado de granos, resultará en un suministro suficiente de Mo en la semilla así producida para la próxima generación.

Los síntomas de deficiencia de molibdeno son muy semejantes a los de nitrógeno ya que éste es esencial para reducir el N mineral e incorporarlo a los tejidos como proteínas. En el caso de las leguminosas, por ser parte de la enzima nitrogenasa, su deficiencia afecta también la fijación del N<sub>2</sub> del aire. En los primeros estadios de desarrollo de los síntomas, las hojas parecen verde-pálido y tienen áreas necróticas adyacentes a las nervaduras centrales de los folíolos, entre las nervaduras principales y a lo largo de los márgenes. (Verneti, 1983).

Foto N° 9. Ver Apéndice

### *Zinc*

La deficiencia de zinc puede ocurrir bajo condiciones muy variadas del suelo. Su ocurrencia es muy común en suelos calcáreos o con afloramientos de calcáreo como ocurre en suelos Vertisoles de Entre Ríos. También es frecuente en aquellos suelos con baja disponibilidad natural de zinc como muchos suelos derivados de areniscas. En regiones tropicales y subtropicales, la causa más común, son aplicaciones muy elevadas de calcáreo. La deficiencia de zinc también es muy común en regiones de baja cantidad de lluvias, donde parte de la camada de suelo fue removida por erosión o para nivelamiento del terreno o construcción de terrazas.

Otra causa muy común es la deficiencia inducida de Zn por aplicaciones elevadas de fertilizantes con fósforo que reducen la absorción de zinc aun en condiciones de buena disponibilidad del elemento en el suelo (Lonergan y Webb, 1993; Marschner, 1995).



Los síntomas típicos de la deficiencia de Zn son plantas pequeñas, con clorosis internerval y bronceado de las hojas inferiores (Vitosh *et al.*, 1995). Los folíolos con deficiencia quedan de menor tamaño, con áreas cloróticas entre las nervaduras, siendo estos síntomas más severos en las hojas basales. Los tejidos cloróticos tienden a quedar de color marrón o ceniza y mueren prematuramente. La madurez se atrasa y se producen pocas vainas (Borkert *et al.*, 1994).

Foto N° 10. Ver Apéndice

### **4.3. El uso de análisis foliar**

El análisis cuantitativo de los nutrientes en los tejidos vegetales, ya sea de hojas, pecíolos, frutos, semillas o de la planta completa, son usados con frecuencia como método de diagnóstico de fertilidad. La planta integra muchos factores que hacen a su nutrición y el análisis de la concentración de un determinado elemento puede asociarse con la respuesta al aporte de ese nutriente en aumentos de rendimiento o de calidad. Se basa así en el mismo principio que los análisis de suelo. Sin embargo, esto no siempre es posible ya que intervienen factores fisiológicos, por ejemplo: algunos nutrientes tienen mucha movilidad dentro de la planta ya sea por el xilema o por el floema, mientras que otros son fijados a medida que se desarrolla la parte de la planta y no se remobilizan.

El uso de la técnica comprende tres partes bien diferenciadas: el muestreo, el análisis y la interpretación.

#### **4.3.1. Muestreo**

El análisis del estado nutricional de la soja se efectúa comúnmente en las hojas con pecíolos. Debido a la redistribución de los nutrientes entre los distintos órganos de la planta, en diferentes estadios del ciclo, el muestreo de hojas de soja para el análisis químico debe efectuarse en la época de floración plena (R2), recolectándose entre 30 y 40 hojas recién desarrolladas con pecíolo, que corresponden a la 3ra o 4ta a partir del ápice del tallo principal. Small y Ohlrogge (1973) diferencian la época de muestreo según los cultivares sean de crecimiento determinado en R1, al inicio de la floración, de los cultivares de crecimiento indeterminado, en R2, en floración plena.

Según esas recomendaciones, los resultados de los análisis de diversas muestras y de diferentes años agrícolas son comparables, ya que las muestras serán recogidas de plantas con la misma edad fisiológica. En la necesidad de muestrear hojas fuera del periodo recomendado, se sugiere que sean

recolectadas también hojas de plantas normales, que servirán para comparación (Jones *et al.*, 1991).

#### 4.3.2. Análisis químico

El análisis químico de las hojas tiene el objetivo de determinar el contenido de nutrientes, macro y micro en los tejidos foliares y compararlos con los de plantas bien nutridas a fin de verificar el estado nutricional de las plantas y, conjuntamente con los resultados del análisis del suelo, cuantificar las necesidades de aplicación de nutrientes para los próximos cultivos.

Una vez que las muestras han sido recolectadas del campo, se envían al laboratorio para proceder al análisis químico. Con anticipación deben lavarse con agua desmineralizada, secadas en estufa a aproximadamente 60°C, hasta peso constante por unas 48 horas y finalmente molidas a partículas menores de 0.25 mm. Para la determinación de los distintos elementos en la muestra vegetal, debe destruirse el material orgánico, por una de las dos vías: *a*) mineralización seca (Mufla a 900°C), o *b*) mineralización húmeda (Ataque con ácidos, normalmente una mezcla de nítrico y perclórico o con peróxido de hidrogeno). A continuación se determinan los contenidos de cada nutriente en la muestra.

Los resultados de los análisis de macronutrientes se expresan en gramos por kg de materia seca o en unidades de porcentaje (%) relativos al peso del material seco del vegetal, en tanto que los micronutrientes se expresan en ppm, partes por millón, también en relación al peso de la materia seca.

#### 4.3.3. Interpretación de los resultados

Para la interpretación de los resultados de los análisis de tejidos vegetales existen dos criterios principales: 1) rangos de suficiencia y 2) relaciones y proporciones entre nutrientes o DRIS.

El criterio de suficiencia es el más popular y se pretende que los valores foliares no sean inferiores a un nivel crítico o se sitúen dentro de un rango de suficiencia. De manera que al modificar, incrementando o reduciendo las dosis de fertilizante, los valores del nutriente se ubiquen entre las categorías de alta (exceso) o baja (deficiencia) disponibilidad.

Los análisis que detectan valores en los rangos de bajo a deficiente, pueden estar asociados a síntomas visibles de deficiencias o a rendimientos reducidos. Por el contrario, análisis foliares en los rangos alto a exceso, se asocian a derroches en la utilización de fertilizantes a situaciones de toxicidad que conducen en potencia a bajos rendimientos o mala calidad del producto de cosecha.

Con los resultados del análisis químico de las hojas maduras, se realiza el monitoreo del estado nutricional del cultivo. Los niveles de suficiencia publicados por Jones, (1991) hace algunos años son ampliamente usados en Argentina y en Brasil (EMBRAPA, 1998) y se muestran en la Tablas 4.24 y 4.25 junto con los valores observados por Martins (comunicación personal, citado por Yamada, 1999) en cultivos con rindes superiores a 3.6 mt ha<sup>-1</sup> y los observados por Flannery (1989), en cultivos donde obtuvo 8 mt ha<sup>-1</sup>. Se incluye además valores más frecuentes (mediana) y el desvío estándar de un relevamiento de 154 muestras de la región pampeana de Argentina con un rendimiento promedio de 3.9 mt ha<sup>-1</sup> (Melgar *et al.*, 2003). Los niveles de EMBRAPA coinciden con los de Jones *et al.* (1991) excepto para N, que indica un límite inferior menor como valor normal (40.1 en lugar de 45.1 g kg<sup>-1</sup>).

**Tabla 4.24.** Concentraciones de nutrientes suficientes o promedio usados en la interpretación de los resultados de análisis foliares de soja del tercio superior al comienzo de la floración (Jones *et al.*, 1991, EMBRAPA, 1998) y las observadas en lotes de alta productividad según distintos autores.

Elemento	Jones <i>et al.</i> (1991), EMBRAPA (1998)	Yamada (1999)	Flannery (1989)	Melgar <i>et al.</i> (2003)
	..... g kg <sup>-1</sup> .....			
N	40.1(45.1)-55.0	46.4 ± 3.7	53.3	55.5 ± 1.4
P	2.6-5.0	2.5 ± 0.3	3.6	5.0 ± 0.1
K	17.1-25.0	18.7 ± 2.4	21.9	27.0 ± 0.5
S	2.1-4.0	2.5 ± 0.3	2.4	9.0 ± 0.2
Ca	3.6-20.0	7.9 ± 1.7	10.2	3.4 ± 0.1
Mg	2.6-10.0	3.3 ± 0.6	3.3	3.3 ± 0.1
	..... mg kg <sup>-1</sup> .....			
B	21-55	51 ± 10	46	37 ± 8
Cu	10-30	8 ± 1.8	12	143 ± 35
Fe	51-350	100 ± 34	144	11 ± 3
Mn	21-100	35 ± 12	30	82 ± 20
Mo	1-5	-	-	-
Zn	21-50	45 ± 10	48	48 ± 18

**Tabla 4.25.** Interpretación de los resultados de análisis de hojas de soja en función de sus concentraciones de nutrientes (Jones *et al.*, 1991).

Elemento	Clase de Interpretación		
	Bajo	Suficiente	Alto
	.....g kg <sup>-1</sup> .....		
N	31-40	40.1-55	55.1-7.0
P	1.6-2.5	2.6-5.0	5.1-8.0
K	12.6-17	17.1-25	25.1-27.5
S	1.6-2.0	2.1-4.0	>4.0
Ca	2.1-3.5	3.6-20.0	20.1-30.0
Mg	1.1-2.5	2.6-10.0	10.1-15.0
	.....mg kg <sup>-1</sup> .....		
B	10-20	21-55	56-80
Cu	5-9	10-30	31-50
Fe	31-50	51-350	350-500
Mn	15-20	21-100	101-250
Mo	0.4-0.9	1.0-5.0	5.1-10
Zn	10-20	21-50	51-75

El método DRIS o Sistema integrado de diagnóstico y recomendación, emplea los cocientes entre las concentraciones de los nutrientes, para la interpretación de los resultados de análisis foliar (Jones *et al.*, 1991). Entre sus principales ventajas se destaca el escaso efecto de la época de muestreo en las relaciones entre nutrientes. En consecuencia, para realizar el diagnóstico pueden tomarse muestras foliares en cualquier momento del año. Se basa en que si bien, en términos absolutos, las concentraciones de los elementos aumentan o disminuyen durante el desarrollo de la planta o del tejido vegetal, las relaciones entre las concentraciones de los distintos nutrientes permanecen relativamente constantes (N/P, N/K, P/K, Ca/Mg y Mg/K).

Las relaciones de concentraciones de nutrientes en las poblaciones de alto rendimiento se denominan NORMAS DRIS. Éstas se consideran óptimas y son las que se comparan con las que se obtienen a partir del análisis foliar de una muestra del cultivo que se desea diagnosticar. La comparación entre las muestras sobre las que se desea realizar un diagnóstico con la de las NORMAS DRIS se realiza por interpretación matemática de los índices. El DRIS provee bases matemáticas de ordenamiento de un gran número de relaciones entre nutrientes, en forma de índices, que pueden ser interpretados con facilidad por medio de un rango relativo de deficiencias y excesos. Este sistema no tiene mucha aceptación debido a la complejidad de su cálculo y a las críticas sobre la

falta de bases científicas sólidas que sustenten el método de interpretación. Tiene la ventaja de ofrecer un rango de desbalances o desequilibrios.

#### **4.4. Fertilización con nitrógeno e inoculación**

Este tópico es controversial, ya que si bien está probado que existen evidencias objetivas de respuestas al agregado de N, es difícil aceptar la práctica como tal. Es también un fértil campo de discusión científica, el balance de N en los sistemas adonde la soja es central en la rotación. Es así, ya que el debate sobre los biocombustibles trajo a consideración que el N aplicado a las cereales insume ingentes cantidades de energía, que la inclusión de la soja evita o mitiga. Sin embargo, el monocultivo puede provocar importantes daños ambientales en materia de sanidad vegetal, de extracción y drenaje de otros nutrientes. Además, no necesariamente el balance de N en el suelo es positivo, es más, se argumenta que en general es negativo (Álvarez *et al.*, 1995).

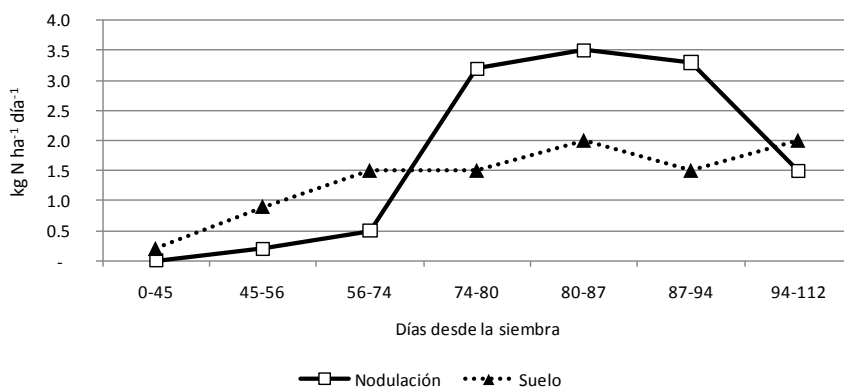
Por otro lado remanece la dificultad en predecir las eventuales respuestas al N, de modo que sea posible establecer un criterio para la toma de decisiones de manejo que sean económicamente viables. La soja, como leguminosa, tiene la capacidad de fijar N del aire y es difícil, éticamente, justificar el agregado de fertilizantes nitrogenados, aun con respuestas económicas directas, ya que en todo caso, no se incluyen algunos pasivos ambientales. Dado que el tema tiene varias aristas, las trataremos por separado.

Como otros factores de producción, está establecido con claridad que el rendimiento de la soja está fuertemente vinculado a la cantidad de N acumulado por la planta. En una revisión de más de seiscientos experimentos publicados en los últimos cuarenta años, Salvagiotti *et al.* (2008) encontró una relación de 13 kg de soja por cada kg de N con límites entre 6.4 y 18.8 kg de soja por kg de N acumulado en la planta.

Dada esta dependencia, general para todos los cultivos, sigue por saber cuánto de esta cantidad de N corresponde a la fijación biológica (FBN) y cuánto es aportado por el suelo y eventualmente cuál es el potencial de aporte por los fertilizantes. En promedio, se asume que entre el 50 y 60% de la demanda de N por la soja N se resuelve por la fijación biológica, lo que implica que en una gran mayoría de situaciones, la cantidad de N fijada no es suficiente para compensar la exportación de N del predio con el grano cosechado. Dado que por razones metodológicas los autores miden el N de la parte aérea, la revisión citada expresa que cuando se asume una contribución de las raíces, en promedio equivalente al 24% del total de N de la planta, los balances son cercanos a la neutralidad (Salvagiotti *et al.*, 2008).

#### 4.4.1. Demanda de N y FBN

Independientemente de las cantidades de N aportados, la soja se infesta temprano con los Rhizobios, nativos naturalizados o introducidos. La aparición de los nódulos se da entre el cuarto y sexto día desde la germinación y a los doce días puede detectarse la actividad de la nitrogenasa, responsable de la transformación del  $N_2$  en amonio. El proceso de FBN alcanza su máximo en el estadio de floración plena (R4) y después disminuye a partir del llenado de granos participando, progresivamente, menos en el suministro de N durante todo el ciclo. Las tasas de fijación son crecientes a lo largo del ciclo de crecimiento, incrementándose exponencialmente a partir del comienzo de la floración (Vargas y Suhet, 1982). En el ínterin, el suelo provee cantidades de N en función de su disponibilidad, pero que pierde importancia relativa a medida que la contribución de la FBN es mayor (Zapata *et al.*, 1987), (Fig. 4.10).



**Fig. 4.10.** Tasa de asimilación del N proveniente del suelo y de la fijación biológica en distintos estadios del cultivo de soja. Adaptado de Zapata *et al.* (1987).

#### 4.4.2. Inoculación y reinoculación

La especificidad, infectividad y la efectividad en la FBN son atributos importantes que caracterizan el proceso, siendo el *Bradyrhizobium japonicum* el específico propio de la soja. Se distinguen habitualmente las cepas de Rhizobios naturalizadas de las introducidas, que sacrificaron su eficiencia original para adaptarse a las condiciones más hostiles y cambiantes del suelo cuando no están en simbiosis. Las cepas naturalizadas son más resistentes, más competitivas y

menos eficientes en la FBN que las introducidas por la inoculación (Fernández Caniggia y Díaz Zorita, 2008).

El mecanismo de la infestación es conocido a través de excelentes revisiones (Bauer, 1981; Quispel, 1983). Este conocimiento ha servido para perfeccionar la operación agronómica de inoculación, a través de la selección de buenos métodos y mejores sistemas para preservar la viabilidad de los Rhizobios en medios de conservación y transporte, así como su compatibilidad con fungicidas e insecticidas cura-semillas, muchas veces letales en contacto con el medio de inoculación. De estos avances ha surgido por ejemplo, la revalorización de la re-inoculación como práctica, que ante poblaciones establecidas de microorganismos y adaptadas a las condiciones del suelo, resultan en ganancias de rendimientos importantes y sobre todo de alto retorno, dado el bajo costo de la operación de inoculación (González, 2000). Las recomendaciones de buenas prácticas de inoculación deben contemplar (Peticari, 2004):

- No reducir las dosis de inoculante recomendadas por kg de semilla.
- Cuidar las condiciones de almacenamiento: lugares frescos, (>20 °C) y no expuestos al sol.
- No mezclar al inoculante con otros agroquímicos (fungicidas, insecticidas, fertilizantes) no recomendados por los fabricantes del inoculante.
- Proceder a la inoculación a la sombra, con un mezclado minucioso con la semilla y sembrando lo antes posible bajo condiciones favorables para la rápida implantación del cultivo.
- Controlar la nodulación en etapas tempranas del cultivo.

Siendo que en general, no existen cepas nativas del Rhizobio específico, *Bradyrhizobium japonicum*, en los suelos vírgenes de los países de Sudamérica, es evidente la necesidad de inocular los campos abiertos al cultivo de la soja. Asimismo hasta hace poco era común no recomendar la reinoculación debido a la falta de efectos visibles sobre los rendimientos, en una gran extensión del área sojera. Por experiencia local y extranjera se indican algunos hechos que podrían revocar esa opinión, sobre todo considerando que las cepas mejoradas son más eficientes en la FBN que las naturalizadas.

En Argentina, un proyecto de instituciones oficiales y empresas productoras de inoculantes llevó a cabo 41 ensayos realizados durante tres años con una respuesta media de 265 kg ha<sup>-1</sup> en campos con historia de soja previa, es decir, con poblaciones de Rhizobios naturalizadas. Estos resultados observados son coincidentes con la información recolectada por el proyecto, que incluía 193 ensayos realizados desde 1990 al 2005 inoculando con cepas muy eficientes y

métodos de inoculación apropiados, adonde se observó respuesta positiva en un 84% de los casos, con una respuesta promedio de aproximadamente 300 kg ha<sup>-1</sup>, equivalentes al 11% del rendimiento de los cultivos, siendo las más altas en el norte y las más bajas en el núcleo de la región pampeana. (Peticari, 2004).

En Brasil, comparado con testigos sin inoculación, la reinoculación aumentó significativamente la contribución de la FBN estimado en promedio de un 79 a 84%), resultando 127 kg ha<sup>-1</sup> adicionales de rinde, equivalente al 4.7% y en 6.6% más del N total en grano (Hungria *et al.*, 2005).

Con relación a la dinámica de la introducción de cepas, Racca (2000) resume: La eficiencia de la nodulación depende de la cepa que coloniza, el lugar de la raíz donde lo hace y las condiciones de desarrollo de las plantas. Cuando se inocula con el Rhizobio específico, la bacteria se naturaliza en los suelos. Las cepas introducidas de *B. Japonicum* naturalizadas puede permanecer en el suelo más de diez años (se calcula en más de 30 años). Al cabo de 4 a 5 años luego de introducida, la cepa cambia tanto que es prácticamente diferente de la original. El equilibrio de las poblaciones de Rhizobio en el suelo puede alterarse con adiciones sucesivas de otras cepas. La diferencia a favor de la cepa inoculante ocurre recién después del tercer ciclo. Sólo cepas muy competitivas pueden alterar el equilibrio; otras, hasta el quinto ciclo no lo hacen, por esa razón las inoculaciones alternadas pueden no tener ningún efecto, mientras que las anuales y repetidas, sí. Es decir, adiciones sucesivas y constantes de cepas competitivas posibles desplazan el equilibrio entre cepas naturalizadas e introducidas.

La eficiencia de la reinoculación depende de la competencia bacteriana. Suelos con población de *B. japonicum*, inferior a 1,000 bacterias g<sup>-1</sup> de suelo responden económicamente a la reinoculación: 50% de los nódulos pertenecerían a las bacterias inoculantes. En los suelos con historia sojera (cepas naturalizadas) cerca del 80% de los nódulos formados pertenece a las bacterias del suelo y un 20% a las introducidas por el inoculante.

Para que el 50% de los nódulos se formen con cepas inoculadas, la concentración del inóculo debe ser más de 1000 veces superior a la población naturalizada por gramo de suelo. (p. ej. Si en el suelo hay 10<sup>6</sup> bacterias g<sup>-1</sup>, en el inoculante debe haber 10<sup>9</sup> bacterias g<sup>-1</sup>. Debe existir más de dos veces y media *B. japonicum* por semilla que por gramo de suelo para que el 50% de los nódulos sean de la cepa inoculada. La reinoculación de plantas adultas no es factible, ya que las raíces primarias son receptivas sólo en los primeros días. La mortandad de *B. Japonicum* sobre semillas que se secan o asolean es



extremadamente brusca, de allí la importancia de la técnica de la operación de inoculación.

#### 4.4.3. Efecto de niveles de N en el suelo

Entre los factores que estimulan o desestimulan la infestación de Rhizobios a las raíces de la soja, figura la cantidad de N mineral presente en el suelo. En suelos más ricos la soja preferirá: utilizarlo en lugar de gastar sus recursos fotosintéticos, en mantener la simbiosis y al contrario, si hay bacterias y el N del suelo es deficiente, la planta estimula la infestación. El N disponible en el suelo tiene gran influencia en la fijación de  $N_2$ . La disponibilidad de N del suelo en diferentes lugares determina la contribución relativa del  $N_2$  fijado simbióticamente (George *et al.*, 1988). Esto explica muchas evidencias de fallas en la infestación ante fertilizaciones tempranas de N (Hungria *et al.*, 2008) o ante excesos de nitrógeno en el suelo, en particular en forma de nitratos. La presencia de altos niveles de nitratos inhibe la fijación de  $N_2$ , pero aunque no hay explicación fisiológica satisfactoria de esto, la inhibición de la simbiosis se da en todos los pasos, desde la infección, formación del nódulo y la fijación de  $N_2$ , la cual, si se produce, no es eficiente (Malik *et al.*, 1987; Vessey y Waterer, 1992).

#### 4.4.4. Efecto de la fertilización con N

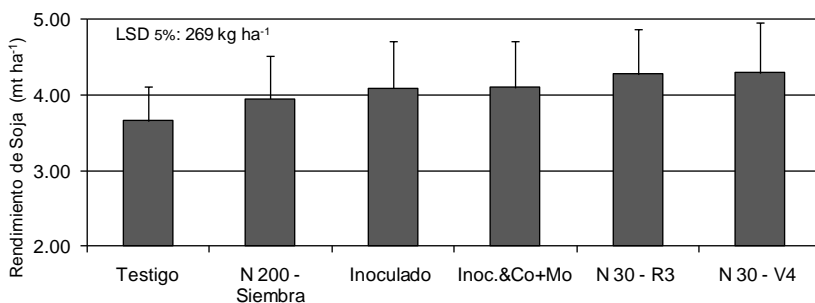
Los niveles bajos de nitrógeno en los primeros estadios vegetativos en los que todavía los nódulos no son funcionales pueden ser beneficiosos. Pero, a medida que el nitrógeno proveniente del suelo o del fertilizante aumenta, el nitrógeno derivado de la fijación biológica y la nodulación disminuye. Se ha cuantificado la disminución de los nódulos en aproximadamente 90 mg de MS de nódulos por planta por cada ppm de  $N-NO_3$  del suelo (Cicore *et al.*, 2004)

Así, las labranzas, que permiten mayor disponibilidad de agua y mejor oxigenación a la siembra, favorecen a las cepas introducidas, es decir condiciones no estresantes y altas concentraciones de inóculo en la semilla. En condiciones de suelo más estresantes, suelos más secos o más compactados se favorecen las cepas naturalizadas, ya que estas son más hábilmente competitivas. Para la soja en particular, ante condiciones no estresantes, los nódulos se ubican en la raíz primaria, mientras que en condiciones estresantes los nódulos se ubican en la raíz secundaria. Lo más importante de estas diferencias se refieren a la capacidad de fijación de estos nódulos: a igual peso de nódulos, los de la raíz primaria fijan cerca de 10 veces más N que los situados en la raíz secundaria (36.0 contra 2.9 mM N  $mg^{-1}$  hora<sup>-1</sup>).

Las respuestas más probables de soja a la fertilización con nitrógeno se esperan en ambientes con condiciones de alta producción, superiores a las 4.5 mt ha<sup>-1</sup>. Se ha observado una relación inversa entre la FBN y las dosis de N aplicado. La colocación profunda de fertilizantes de N de liberación lenta debajo de la zona de nodulación o aplicado durante las últimas etapas reproductivas, pueden ser alternativas prometedoras para alcanzar respuesta de la producción a la fertilización al nitrógeno en ambientes de alto rendimiento.

Wesley *et al.* (1998) en un grupo de ensayos llevados en cuatro sitios durante dos campañas en Lincoln, NE, evaluaron las respuestas al N de varias dosis y fuentes aplicado entre R-3 y R-4, con respuestas positivas en seis de ocho sitios. En donde no hubo respuesta los cultivos rindieron menos de 3.35 mt ha<sup>-1</sup>. Brevedan *et al.* (2007) logró respuestas en seis de diez ensayos en Buenos Aires con N aplicado en R5, obteniendo aumentos de rindes de 284 kg ha<sup>-1</sup> de grano (11% sobre el testigo) y de 5% de proteína (13% más que el testigo) por el agregado de 30 kg ha<sup>-1</sup> de N de distintas fuentes.

Sin embargo, la cuestión es el valor del incremento. Melgar *et al.* (2009a) en el norte de la región pampeana, obtuvo 205 kg ha<sup>-1</sup> de aumento de rendimientos sobre un control inoculado, por la aplicación de 30 kg ha<sup>-1</sup> de N en V-4 o en R3, en un conjunto de ensayos en seis sitios-años, pero el incremento logrado por la reinoculación por sobre un testigo sin inoculantes fue del doble (430 kg ha<sup>-1</sup>) (Fig. 4.11).



**Fig. 4.11.** Efecto de aplicaciones de N en distintos estadios comparado con testigo inoculado y sin inocular. Media de 6 sitios-años (Melgar *et al.*, 2009a).

Los resultados de muchos ensayos de fertilización con N se confunden con frecuencia debido a una subóptima o deficiente FBN o a otros factores de

manejo que pudieron haber impedido alcanzar el potencial de rendimiento con la FBN.

#### 4.4.5. Efecto de los residuos y antecesores

En vista de lo expresado en el párrafo anterior, las prácticas que aumenten la presencia de residuos de alta relación C/N sobre el suelo, como la siembra directa o el cultivo previo de maíz o sorgo como antecesores, producirá inmovilización temporal de N por asimilación de las bacterias y se favorece por lo tanto la FBN (Racca, 2000).

Mientras el N se encuentre inmovilizado se favorece la FBN, en cambio, si se mineraliza el N se favorece la asimilación directa de la planta a expensas de la eficiencia de la FBN. Los rastrojos del cultivo antecesor influyen decididamente al modificar la relación C/N del sustrato. Con una relación C/N mayor a 35:1 se produce inmovilización del N del suelo; por el contrario, con una relación C/N menor a 30:1 se produce la mineralización del N edáfico. En otras cifras, si el contenido de N del rastrojo es menor a 1.7%, se inmoviliza N del sistema y si es mayor se libera N al sistema. Como los rastrojos de cereales tienen generalmente cerca de 0.5% de N se facilita la FBN; el rastrojo de soja tiene un promedio de 1.7% de N, por lo tanto su efecto es neutro, en cambio un residuo de alfalfa con más de 3% de N se dificultaría la FBN.

Una inmovilización inicial con posterior liberación permitirá aumentar la complementariedad de las fuentes. Aun en los suelos con suficientes Rhizobios, la reinoculación con cepas más eficientes ha demostrado repetidamente sus ventajas. Por medio de la reinoculación, se logra que entre un 15 y un 20% de las bacterias seleccionadas como más infectivas y eficientes colonicen las raíces de las soja (Racca, 2000).

Cuando el nivel de N inorgánico en el suelo es bajo, los microorganismos son más eficientes que las plantas de cultivo para absorberlo. Un rastrojo con 1% de N, inmovilizará al N por una semana y lo liberará 3 a 4 meses después. Esto es muy importante para sincronización y complementariedad de los aportes de N. La FBN aportará el N para la soja entre aproximadamente V3 y R5, cuando la demanda por el llenado de granos es máxima y privilegia por sobre el envío de fotosintatos a los nódulos de las raíces. Es entonces cuando la re-movilización del N acumulado o el menguado aporte por la FBN pueden no ser suficientes para alcanzar los rendimientos potenciales. Es en estas situaciones adonde se han verificado respuestas a las aplicaciones de N mineral (Wesley *et al.*, 1998; Bredan *et al.*, 2007).

#### 4.4.6. Efecto del stress ambiental sobre la FBN

Una vez que las bacterias se implantaron y se formaron los nódulos, la eficiencia de la FBN depende de las condiciones de crecimiento de la planta. Es decir: temperatura, radiación, tenor de oxígeno y en especial de la disponibilidad hídrica que condicionen el proceso. Esto último se debe a que la FBN es extremadamente sensible al estrés hídrico. La razón principal es dicho estrés resulta en un gasto energético mayor y la planta privilegia su economía del agua antes que alimentar a los nódulos. Las cepas naturalizadas son más competitivas y más resistentes al estrés pero menos eficientes en la FBN que las recientemente introducidas.

Cada vez que el agua útil disminuye por debajo del 60%, umbral crítico para la soja durante el llenado de granos, se compromete también la fijación de N, que es máxima en esta etapa disminuyendo el rinde potencial. Normalmente la capacidad de fijación de los nódulos se restablecen si las condiciones de sequía no son tan severas o duran muchos días, no obstante llega un punto (menos del 10% del agua útil) que aunque los nódulos y el cultivo, recuperen su humedad al llover o regarse, la capacidad de fijación de los nódulos, medida por la actividad de la nitrogenasa, no se recupera más (Graham, 1996; Racca, 2000).

La simbiosis Rhizobio-leguminosa es muy sensible a la carencia de fósforo. Para que sea posible la nodulación y fijación de N<sub>2</sub>, es necesario un aporte adecuado de fósforo por la fertilización. Cuando la concentración de P en la planta es inferior al 0.2%, la nodulación y la fijación de N<sub>2</sub> son casi despreciables. Por debajo de 0.1% ni siquiera se formarán nódulos. Las concentraciones de fósforo en los nódulos son en general mayores que las concentraciones en el tallo o en el resto de la raíz (Israel, 1993).

Otros nutrientes han sido identificados como responsables del funcionamiento eficiente del mecanismo de la FBN, (Tabla 4.26), particularmente los micronutrientes B (Yamagishi y Yamamoto, 1994), Co (Ahmed y Evans, 1961) y Mo (Shah *et al.*, 1984). La deficiencia de alguno afecta la FBN por diversos mecanismos (Guiller, 2001).

En conclusión queda planteado si los requerimientos de N por la soja para alcanzar su máximo potencial de rinde pueden satisfacerse, solamente, con una FBN optimizada o por la aplicación complementaria de fertilizantes, a su vez, necesariamente mejorada. Esta doble optimización requerirá evaluar nuevas tecnologías de inoculación, mayor precisión temporal en el manejo del cultivo y del suelo y más importante, mediciones detalladas de las contribuciones de N del suelo N y por la FBN y la eficiencia de absorción del N del fertilizante a lo largo del ciclo de cultivo.

**Tabla 4.26.** Efecto de la carencia de los principales micronutrientes en la simbiosis Rhizobio-leguminosa y su función en la planta. Adaptado de Guiller (2001).

Elemento	Efecto (por carencia)	Función
Boro	Reducción en el tamaño de los nódulos	División celular
Cobalto	Reducción y retraso en la iniciación nodular	Presente en enzimas de los Rhizobios
Cobre	Reducción en la fijación de N	(No es claro)
Hierro	Reducción en la iniciación nodular, desarrollo de los nódulos y tasa de fijación	Constituyente de proteínas y leghemoglobina
Molibdeno	Nódulos inefectivos. Deficiencia de N	Constituyente de la nitrogenasa
Níquel	Retraso de la nodulación. Reducción del crecimiento de la planta	Presente en enzimas en la planta y en los Rhizobios
Selenio	Reducción de la actividad hidrogenasa y crecimiento en Rhizobios libres	Constituyente de la hidrogenasa de <i>Bradyrhizobium</i>
Zinc	Reducción en el número y tamaño nodular.	Posiblemente involucrado en la síntesis de leghemoglobina

#### 4.5. Uso de fertilizantes más comunes

##### 4.5.1. Fertilizantes fosfatados

La producción económica de la soja en Sudamérica, depende mucho del suministro de fósforo como fertilizante. Prácticamente la totalidad del área en Brasil, Paraguay y Uruguay y más del 60% en Argentina se fertiliza regularmente con fósforo. Sólo en Bolivia y en algunas regiones del Chaco y del norte de Argentina, con altos niveles de P nativo, no usan fertilizantes fosfatados por ahora. Muchas regiones de Argentina o Uruguay además, fertilizan el trigo con dosis de P que compensan la extracción del cultivo de soja subsiguiente, de manera similar al *Corn Belt*, que fertilizan maíz suficientemente como para nutrir el cultivo de soja en rotación.

A su vez, la soja es el cultivo más importante para la industria de los fertilizantes fosfatados, tanto en Brasil como en Argentina, representando una alta proporción de los volúmenes total consumidos de fertilizantes fosfatados (Tabla. 4.27). Si bien no se dispone de estadísticas actualizadas de Paraguay, es posible que su participación sea mayor aun, dado el mayor peso de la soja en la agricultura paraguaya.

**Tabla 4.27.** Consumo total de fertilizantes fosfatados en todos los cultivos y en soja en Brasil y Argentina.

País	Consumo Total	Consumo Soja	Soja/Total	Referencia
	<i>1,000 mt año<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></i>		<i>...%...</i>	
Brasil	3,457	1,671	48	FAO 2004b
Argentina	624	220	35	FAO 2004a Fertilizar 2006

Salvo en Brasil, que hace un importante uso de rocas fosfóricas como uso directo, el resto proviene de fertilizantes solubles como superfosfato simple, triple y fosfatos mono y diamónico, en uso directo o en mezclas físicas con fertilizantes potásicos.

Tanto Brasil como Argentina poseen fábricas locales de fertilizantes fosfatados, pero la industria de fertilizantes del primer país es más antigua y desarrollada, además posee fuentes propias de rocas fosfóricas y produce ácido fosfórico y fertilizantes fosfatados derivados de alta ley. Sólo, recientemente, Argentina instaló plantas de manufactura de superfosfato simple, para reducir su dependencia de mercados externos. Las plantas dependen sin embargo, de roca fosfórica importada. Uruguay dispone desde hace muchos años de una planta de superfosfato simple y abastece a los mercados regionales además de su propia demanda. En este contexto, el superfosfato simple es un excelente producto ya que provee no sólo el P necesario sino azufre.

#### 4.5.2. Fertilizantes potásicos

La demanda de fertilizantes potásicos por los cultivos de soja de Sudamérica es altamente contrastante entre los países productores. Mientras que Brasil es uno de los mayores mercados del mundo en su conjunto demandante de potasio y en particular por la soja, Argentina no demanda en absoluto este nutriente. Paraguay y Uruguay utilizan importantes cantidades de potasio en soja, pero Bolivia prácticamente no lo usa. La proporción de consumo de soja respecto del

total es similar a la fósforo, alrededor de 1.7 sobre un total de 3.9 millones de mt de  $K_2O$  (44%).

El cloruro de potasio es casi el único fertilizante potásico usado en soja y a su vez, su uso casi único en soja es en mezclas físicas a la siembra junto con fosfatos. Se importa casi en su totalidad principalmente de Canadá, Rusia, Bileorrusia, Israel y Alemania.

#### 4.5.3. Fertilizantes con azufre

Además del extensivo uso de la fertilización con fósforo y potasio, en muchas ocasiones los suelos precisan de correcciones con otros nutrientes secundarios. Las principales fuentes de provisión de azufre como nutriente a los cultivos son sulfatos solubles, ya sea proveniente del superfosfato simple o de otras fuentes de otros nutrientes usados en la formulación de mezclas físicas, tales como el sulfato de amonio o de calcio.

En general, no se han observado diferencias de efectividad entre las fuentes que contienen S en forma de sulfatos (Gutiérrez Boem *et al.*, 2004). Si bien el S en forma de sulfatos presenta mayor eficiencia en el plazo de una campaña agrícola, el S elemental sería una alternativa en planteos de largo plazo, debido al menor riesgo de lixiviación de esta fuente fertilizante. Esta fuente ha sido evaluada con éxito por Tysko y Rodríguez, (2006). En comparación con fuentes solubles aplicadas a cultivos de trigo, el S elemental se mineraliza lo suficiente para cubrir las demandas de la soja subsiguiente, pero en trigo, las fuentes solubles son superiores. En soja de primera no hay diferencias entre el S elemental y otras fuentes de  $S-SO_4$  (Melgar *et al.*, 2009a).

El yeso como aporte de S a los cultivos es ampliamente usado en Argentina, utilizándose en forma granular o pelletizado, en aplicaciones en banda o al voleo. Dado su disponibilidad local y por ende su precio accesible, es una fuente popular de S para los cultivos.

En Brasil y Paraguay la presencia de horizontes subsuperficiales ácidos, con alta saturación de aluminio impide el cultivo exitoso, ya que estas capas impiden la penetración de las raíces. Su corrección es posible realizarla no por el encalado, que sólo puede enmendar el pH de la superficie al mezclarse íntimamente el calcáreo, sino por el agregado de yeso. Este se disocia en el suelo y los iones  $Ca^+$  y  $SO_4^-$  migran en profundidad con el proceso de lixiviación, desplazando al  $Al^{3+}$  de los sitios de intercambio y precipitándolo a la vez que el Ca aumenta su proporción en los sitios de intercambio.

Para suelos con  $0.3 \text{ meq Ca } 100 \text{ cm}^{-3}$  o menos y /o  $0.5 \text{ meq Al } 100 \text{ cm}^{-3}$  o más o más de 30% de saturación de Al sobre la capacidad de intercambio efectiva (CEC)<sup>1</sup> en las capas subsuperficiales, el uso de yeso agrícola en altas dosis se recomienda para desplazar al Ca hacia estas capas o reducir la toxicidad de Al en todo el perfil (Lopes Scheid, 1996).

El parámetro de suelo más simple para evaluar las dosis de yeso bajo estas condiciones es el porcentaje de arcilla. Se usan dos sistemas comúnmente:

1. Dosis de yeso ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) =  $300 + (20 \times \% \text{ arcilla})$ , desarrollado por Lopes Scheid (1996), para mejorar la capa entre 20 y 40 cm.

2. Dosis de yeso ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) =  $50 \times \% \text{ arcilla}$ , desarrollado por Sousa *et al.* (1993), para mejorar la capa entre 20 y 60 cm de profundidad. La mejora en rendimientos a partir del uso de yeso en estos suelos, principalmente debido a la mayor penetración de las raíces y uso más eficiente del agua y nutrientes del subsuelo, se reportan como 14% para soja (Sousa *et al.*, 2005). Estas dosis recomendadas de yeso se deben aplicar al voleo en superficie entre 60 y 90 días después del encalado y el efecto residual dura entre 5 y 15 años.

#### 4.5.4. Encalado y Fertilizante con magnesio

El considerable avance de la agricultura en Sudamérica y muy en particular en los Cerrados y suelos de las regiones tropicales y subtropicales de Brasil y Paraguay, así también como en Colombia, implica la necesidad de corrección de la acidez natural de los suelos cuyo estado de arte se presentó en párrafos anteriores. Esta corrección implica el agregado de varias toneladas por hectárea de calcáreo agrícola, calcífico y dolomitas (carbonatos de calcio y de calcio y magnesio) para iniciar la producción económica y otras cantidades variables de mantenimiento. Numerosas fuentes de calcáreos calcíficos y dolomíticos se encuentran en Brasil y Paraguay (Nahass y Severino, 2005) y abastecen las necesidades agrícolas, no obstante la logística es difícil y el costo final elevado, aumentando el costo del desarrollo de las nuevas tierras.

Por la pobre saturación de bases de los suelos, es posible que fácilmente se generen desbalances entre el calcio y el magnesio con el encalado, por lo que muchas veces es necesario corregir con cantidades adicionales de dolomita o de fertilizantes a base de magnesio como la kieserita (sulfato de Mg), o magnesita (óxido de Mg).

---

<sup>1</sup> Capacidad de intercambio efectiva es aquella determinada al pH actual del suelo (Kamprath, 1970). En la practica es la suma de cationes Ca, Mg K y Al.



#### 4.5.5. Micronutrientes

Existe una gran diferencia en el uso de micronutrientes entre los distintos países. Brasil es un gran consumidor de estos productos, mientras que en Argentina y los demás países éste es incipiente.

Los micronutrientes más demandados son el Mn, B y Zn, es decir aquellos cuya deficiencia está más extendida, no sólo por las carencias de los suelos sino también por la susceptibilidad a las deficiencias inducidas por el encalado.

La mayor parte de la provisión de microelementos como fertilizantes se realiza por vía de pulverizaciones foliares, si bien existe tecnología y productos disponibles en forma de granulados sólidos para utilizar en las mezclas físicas y productos complejos que además del P y del S, poseen los micronutrientes más comunes (Lopes Scheid, 1991).

Un caso más particular lo constituyen la provisión de Co y Mo, que debido su bajo requerimiento y más específico de las necesidades para la fijación biológica de N, en general constituye formulados a aplicarse junto con los inoculantes en aplicaciones a la semilla.

#### 4.6. Fertilizantes y resistencia a enfermedades

Se ha avanzado mucho en investigar la evidente asociación entre suelos fértiles y plantas sanas y vigorosas y a la inversa, como se observa el paralelo en el reino animal y lastimosamente entre los seres humanos, individuos mal alimentados sobrellevan peor los ataques de patógenos. La simple observación, fácilmente verificable, que cultivos bien nutridos tienen mayor probabilidad de permanecer sanos o al menos producir rendimientos aceptables en presencia de una o más enfermedades, tiene correlatos en procesos moleculares que controlan el desarrollo de las enfermedades de las plantas.

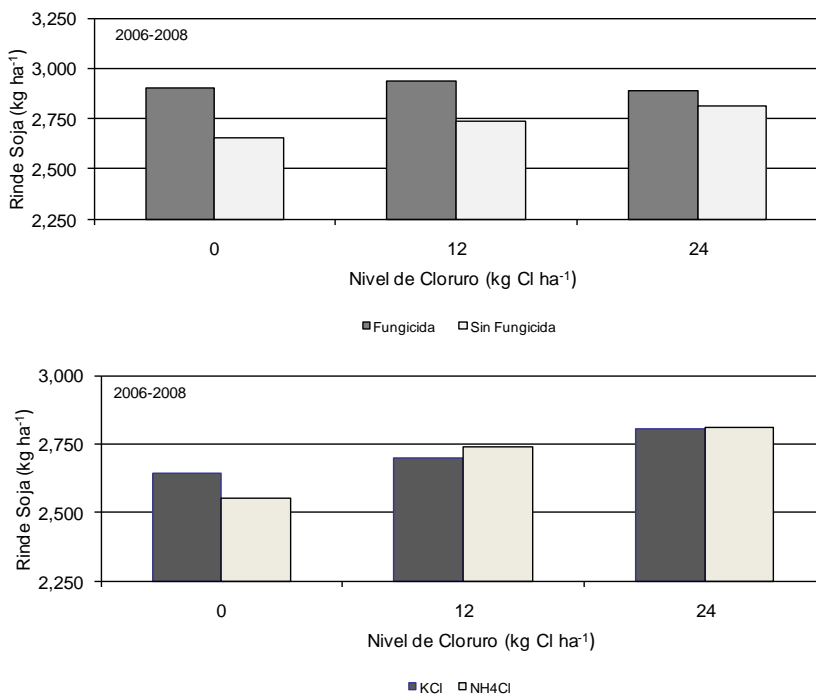
Las investigaciones se han centrado en las fronteras de la fisiología de la nutrición mineral y patología vegetal, a nivel celular y su metabolismo, con los mecanismos de desarrollo de resistencias y tolerancia a los distintos patógenos, así como su heredabilidad, posibles de usarse en el mejoramiento genético. Los estudios han enfatizado prácticamente todos los distintos nutrientes, incluido al fósforo (Amtmann *et al.*, 2006) y al potasio (PPI, 1998) entre los macronutrientes, y a los micronutrientes como el Manganeseo (Huber y Whilelm, 1988) y el Cloro (Fixen, 1993). El efecto de cada uno de los elementos han sido compilados en una reciente revisión (Dantoff *et al.*, 2007), que integra multi disciplinariamente la nutrición mineral y las enfermedades de las plantas.

En el caso particular de la soja, con enormes extensiones sembradas, muchas veces en monocultivo, ha dado sobradas muestras del riesgo de pandemias, la última de ellas, con el avance meteórico de la roya asiática de la soja (*Phakopsora pachyrhizi*) (o *ferrugem*, en portugués) que en menos de 3 años desde la aparición de los primeros focos en 2001 alcanzó todo el área de Sudamérica (Ivancovich, 2005). El impacto económico del mayor incremento del costo de protección del cultivo en los costos de producción debido a esta epidemia ha renovado las investigaciones en mejoramiento genético y en nutrición vinculada a aspectos de resistencia o tolerancia de enfermedades. Aun cuando no en toda la región la virulencia de la roya es igual, las pérdidas provocadas por el conjunto de patógenos de la soja, denominadas genéricamente enfermedades de fin de ciclo, ameritan un esfuerzo en la asignación de recursos para la protección de los cultivos.

La relación entre la ocurrencia de enfermedades de soja y rendimientos resultantes y fertilización fosfatada y otras prácticas de manejo de suelos fue estudiada por tres años en Tucumán, Argentina, observándose que la mancha marrón (*Septoria glycines*) mostraba aparición anticipada y mayor magnitud en condiciones de monocultivo bajo sistemas con laboreo y en ausencia de fertilización fosfatada. En el caso de podredumbre de las semillas (*Diaporthe*, *Phomopsis*) el menor porcentaje de semillas afectadas ocurrió en sistemas de cero labranzas y con fertilización fosfatada (Ploper *et al.*, 1995). En cambio, Díaz Zorita (2006), en un estudio que comprendió 10 sitios de producción ubicados en el centro-norte de la región pampeana, del noroeste y de Paraguay, no encontró interacción significativa entre las respuestas a la fertilización fosfatada y la aplicación de fungicidas foliares para control de las enfermedades de fin de ciclo, sugiriendo que el manejo apropiado de la nutrición mineral del cultivo sería complementado con la adecuada protección del área foliar durante el llenado de granos, pero no reemplazaría la necesidad de aplicación del fungicida.

Las plantas deficientes en potasio se asocian con paredes celulares más finas, raíces más finas y cortas, en suma, menor funcionalidad del sistema radicular, así como una menor acumulación de azúcares en los tejidos y por el contrario acumulación de N sin utilizar. Todos, factores que afectan la infección en particular de roya asiática (PPI, 1998). Frecuentemente se ha buscado discernir el efecto de los nutrientes, ya que muchas veces, ante aplicaciones de fertilizantes potásicos en suelos bien provistos, los aumentos de rendimientos no parecieron vinculados a una nutrición deficiente de ese elemento. Por esa razón, el cloruro mereció una atención particular y en especial buscando la relación entre la incidencia de las enfermedades, la nutrición mineral y el control con fungicidas.

Experimentos recientes en varias localidades de Argentina durante dos campañas, adonde se evaluaron dosis de Cl de dos fuentes: potasio y amonio aplicados a la siembra y cruzados por tratamientos de fungicidas en R1, se encontró que el efecto del Cl, cualquiera sea la fuente resultó en aumentos significativos de rendimientos en algunos sitios y de una tendencia positiva en el promedio de todos los sitios. El efecto del K, en cambio, fue variable en relación al Cl, aumentando o deprimiendo los rendimientos. En ninguno de los casos se encontró asociación con el nivel de disponibilidad de uno u otro nutriente en el suelo. El efecto del fungicida aparentó mitigar la aplicación de Cl, aportando argumentos a la relación entre suministro de Cl y severidad de enfermedades y rendimiento de grano (Fig. 4.12).



**Fig. 4.12.** Respuesta del rendimiento de la soja a aplicaciones de cloruro con dos fuentes y con y sin aplicaciones de fungicidas. Promedio de 8 localidades durante 2006 y 2007, en distintas regiones de Argentina (Melgar, inéditos).

Relaciones similares entre nutrición mineral y enfermedades de la soja, específicamente patógenos de suelo, causantes del síndrome de la muerte súbita

(*Fusarium solani f.sp. glycines*), que causa sustanciales pérdidas de rendimiento en las áreas sojeras del mundo han sido objeto de investigaciones recientes en Illinois. En estos experimentos, para discernir el efecto del K o fuentes que lo contenían, como el cloruro, fueron conducidos por tres años evaluaciones de la interacción de aplicaciones crecientes de cloruro de varias fuentes en dos momentos y algunas variedades. Como resultados de los tres años de estudios, el rinde promedio de soja aumentó entre 0.14 y 0.22 mt ha<sup>-1</sup> a la dosis más alta de Cl a la siembra. No hubo, en cambio, efecto en aplicaciones durante V2 y las fuentes no tuvieron resultados claros. Se probó que antecedentes genéticos específicos afectan la absorción y translocación de Cl. La asociación más fuerte entre fertilización y menor incidencia del síndrome de la muerte súbita fue con KCl (Tablas 4.28 y 4.29), (Ames *et al.*, 2000).

En Brasil, adonde si bien es frecuente fertilizar los cultivos con cloruro de potasio, la generalización de ambientes deficientes en este nutriente provoca asociaciones evidentes entre los suelos mejor fertilizados con potasio y el mejor control de *Phomopsis*, *Cercospora kikuchii* y *Diaporthe phaseolorum*, con mejores resultados de la aplicación de fungicidas (Suzuki y Yuyama, 2004) o la reducción en la aparición de síntomas de roya asiática (Mascarenhas *et al.*, 2004).

Si bien hay, cada día más, un cúmulo de evidencias que ligan el estado del potasio en las plantas y su susceptibilidad a los patógenos y ataque de insectos, en especial en ensayos de campo, la identificación de factores fisiológicos y metabólicos que puedan explicar esa interacción es más bien escasa. En una revisión reciente Amtmann *et al.* (2008), proveen evidencias de la entrada facilitada para el desarrollo de patógenos en las plantas deficientes en potasio. En el esquema se muestra como las concentraciones relativas de ácidos jasmónico y succínico responden ante situaciones de deficiencia, teniendo un rol preeminente como señaladores hormonales para inducir la resistencia a enfermedades (Fig. 4.13).

**Tabla 4.28.** Efecto de variedad, del cloruro (Cl) o fuente de potasio (K) y momento de aplicación en rendimiento de soja. Media de 2 sitios: Urbana y Dixon, 1999 (Ames *et al.*, 2000).

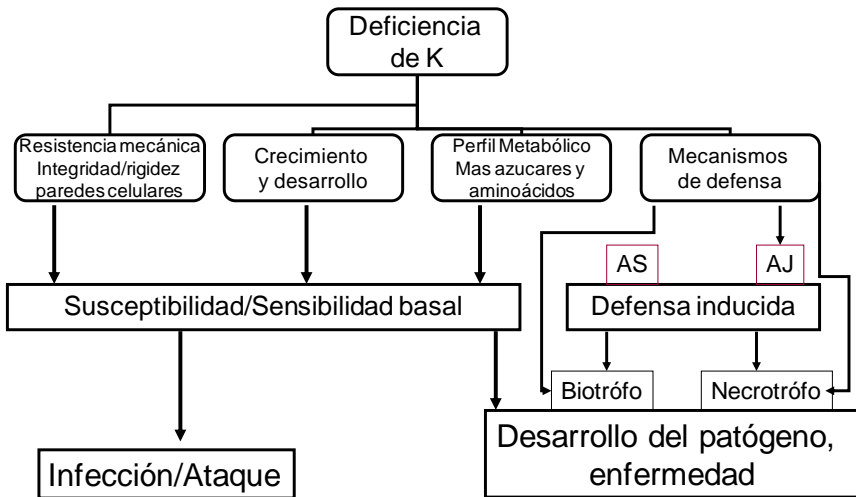
Fuentes	Momento de aplicación	Variedad				Media
		P9363	P9395	P9451	Essex	
		<i>mt ha<sup>-1</sup></i>				
Testigo		3.56	4.54	4.57	2.55	3.80
CaCl <sub>2</sub>	Preemergencia	3.25	4.34	4.43	2.87	3.73
	V-2	3.67	4.39	4.54	2.60	3.80
KCl	Preemergencia	3.74	4.46	4.82	3.18	4.05
	V-2	3.74	4.46	4.82	3.18	4.05
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Preemergencia	3.86	4.69	4.36	2.96	3.97
	V-2	3.62	4.80	4.81	3.12	4.09

Las dosis de aplicación fueron 48 kg de CaCl<sub>2</sub>, 64 kg de KCl y 75 kg de K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup>.

**Tabla 4.29.** Efecto de variedad, dosis y momento de aplicación de Cl en el rendimiento de soja. Promedio de dos sitios: Urbana y Dixon, IL, 1999 (Ames *et al.*, 2000).

Dosis de Cl	Momento de Aplicación	Variedad				Media
		P9363	P9395	P9451	Essex	
		<i>mt ha<sup>-1</sup></i>				
0	Testigo	3.54	4.51	4.41	3.11	3.89
15	Preemergencia	3.63	4.53	4.50	3.44	4.03
15	V-2	3.83	4.69	4.57	3.35	4.11
30	Preemergencia	4.01	4.81	4.86	3.48	4.33
30	V-2	3.67	4.40	4.76	3.57	4.06

Proveen evidencia que la entrada facilitada y desarrollo de patógenos en plantas deficientes en potasio como resultado de cambios físicos y metabólicos, son contrarrestados por una defensa aumentada. La deficiencia de potasio afecta varios procesos fisiológicos y metabólicos que impactan en la susceptibilidad de las plantas a los patógenos.



**Fig. 4.13.** Esquema de desarrollo de defensas en plantas deficientes en potasio (Atmann *et al.*, 2008).

En conclusión, se reconoce que la respuesta sanitaria de cultivos de soja se vincula en parte con su manejo nutricional (oferta de nutrientes del suelo, fertilización e inoculación). En general, los efectos de los nutrientes sobre el comportamiento de la soja, frente a la ocurrencia de enfermedades, serían en algunos casos explicados por efectos directos de control de los patógenos mientras que en la mayoría, indirectos, a partir de mejoras en las condiciones de crecimiento de las plantas. Se espera que el avance de las investigaciones a nivel molecular conduzca a la identificación de genes importantes que relacionan el estado nutricional con el metabolismo y los mecanismos de defensa, que pudieran ser manejados para intervenir en la susceptibilidad de los cultivos bajo una condición determinada de nutrición mineral.

#### 4.7. Fertilización foliar

La fertilización foliar es una práctica crecientemente adoptada en la producción de los países de América del Sur. Si bien es cierto que las respuestas son difíciles de predecir y a veces inexistentes, es evidente que la posibilidad de obtener beneficios económicos a través de diferenciales de rendimientos estimula el uso.

En principio, por las características del cultivo de la soja, frecuentemente pulverizada con herbicidas, insecticidas y fungicidas, descuenta que los costos de aplicación no son tomados en cuenta al hacer el balance económico. Por otra parte, la pulverización es el medio más idóneo para aplicar con uniformidad pequeñas cantidades de un insumo como micronutrientes, que se necesitan precisamente en dosis de pocos  $\text{kg ha}^{-1}$ . Las oportunidades para aplicar nutrientes por vía foliar a la soja incluyen (1) Aplicación temprana (V4 a V6) de un fertilizante completo; (2) Aplicación de N o multinutriente durante el llenado de granos (R2 a R5); y (3) pulverización de micronutrientes durante la etapa vegetativa.

Las conclusiones en base a resultados experimentales conducidos en muchos lugares de EE.UU. son poco favorecedoras de la técnica (Kelling, 2003), sin embargo en Brasil y Argentina es una práctica muy popular y aceptada (Rosolem, 1984).

No obstante, trabajos publicados en EE.UU. por Haq y Mallarino (1998, 2000), registran respuestas en alrededor del 14 y el 22% de los sitios con incrementos promedios de  $70 \text{ kg ha}^{-1}$ . Las respuestas de pulverizaciones en estadios iniciales (V4 a V6) se asocian a suelos de alta capacidad del intercambio catiónico, bajos niveles de P disponibles o cuando las precipitaciones son menores a las normales.

En la región, las experiencias también son contradictorias y son frecuentes las citas que muestran respuestas (Milanez *et al.*, 2005; Arias *et al.*, 2007; Ferraris y Couretot, 2005, 2007), como ausencia de diferencias significativas a las aplicaciones foliares de nutrientes (Borkert, 1987; Barbagelata y Melchiori 2008). Borkert (1987) relata cerca de 281 experimentos de diversos investigadores que evaluaron esta práctica con sólo dos que mostraron respuesta significativa en el rendimiento de grano, demostrando inconsistencia y poca seguridad de éxito en la fertilización foliar.

El uso de micronutrientes foliares puede ser un método más eficiente por las razones expresadas antes y particularmente porque ante un síntoma visual de deficiencia, la corrección lograda por una aplicación foliar es casi inmediata, dada la rapidez de acción por la absorción foliar (Römheld y El-Fouly, 1999). En particular para Boro (Schon y Bevlins, 1990; Oplinger *et al.*, 1993) y Manganeso (Randall y Corey, 1975; Gettier *et al.*, 1985; Camberato 2001).

Estas razones explican el hecho que la soja sea el principal cultivo, destino del mercado de fertilizantes foliares, que en 2004 participó del 49% del total comercializado en Brasil, de un total de 91 millones de litros. En el informe presentado por Pozzan (Stipp y Prochnow, 2008) en un simposio reciente en

Piracicaba, Brasil, se especifica que el Manganeseo (35%), es el micronutriente más consumido, seguido por las mezclas de varios microelementos (21%), por el Zinc (19%) y por el Boro (9%). En Argentina, si bien no hay datos más específicos sobre tamaño de mercado, la gran mayoría son mezclas de NPK y micronutrientes, con preponderancia del N y del S. (Melgar, 2006).



## 5. Conclusiones

Este libro describe el estado de arte de la fertilización en soja de los principales países productores de Latinoamérica, en el Cono Sur del continente. Se han incluido, además, los aspectos más relevantes de la nutrición mineral de la planta de soja, el comportamiento de los macronutrientes y micronutrientes, considerándose su funcionalidad en el suelo, su absorción, las necesidades totales, la exportación por los granos, funciones en la planta, movilidad a través del floema y síntomas de anomalías nutricionales. Estos temas fueron tratados en el marco de las bases ecofisiológicas que sirven además para el mejoramiento genético del cultivo.

Los nutrientes más exigidos por el cultivo son los clásicos N, P, K y S, aunque no necesariamente son los que presentan problemas nutricionales con más frecuencia. Si bien no se han reunido evidencias para sustentar una fertilización con: nitrógeno en el cultivo, salvo casos excepcionales, muchas veces, la inadecuada corrección de la acidez del suelo afecta la simbiosis y hace que la deficiencia de N sea importante. El fósforo y su manejo continúan siendo estratégicos en toda la región por la baja disponibilidad natural de los suelos y el agotamiento de los originalmente bien provistos. El potasio, por su parte muestra los mayores contrastes de uso en las distintas regiones productoras, junto con el calcio y el magnesio, mucho más importante en Brasil y Paraguay y desconocidos en Argentina, Uruguay y Bolivia. El azufre en cambio, es motivo de muchas investigaciones sólo en Argentina. Otros micronutrientes también evidencian la necesidad de considerar juiciosamente los distintos sitios antes de la decisión de aplicación. Como ejemplos de importancia destacada se mencionan el molibdeno, el manganeso, el boro y el zinc. Quizás indirectamente, por su dependencia al pH de los suelos y en especial a la acidez elevada que disminuye su solubilidad. Por otra parte la toxicidad que se presenta en suelos muy ácidos, aparte de la deficiencia inducida por el mal manejo de los correctores calcáreos. El tratamiento de los temas se enfoca en la importancia de la adecuada nutrición de la soja y su influencia sobre los rendimientos, calidad de los granos y la sanidad de las plantas.

Indudablemente, dada la multiplicidad de paisajes naturales y humanos de Latinoamérica, es esperable una gran diversidad en la interpretación de la información de base y en el manejo del cultivo. No hay mayores contrastes que entre un suelo Molisol de la Pampa Argentina y un Oxisol del Cerrado Brasileño. En los dos ambientes se cultivan variedades de soja adaptadas a cada sitio, con distintas dosis de fertilizantes, claro. Pero no varían solamente aquellas tecnologías duras, que dependen del uso de insumos, sino también de aquellas relacionadas al buen uso de estos insumos. El uso de un determinado

método de análisis para P es distinto aun entre diferentes estados del mismo Brasil.

No obstante estas diferencias, es oportuno observar que la industria de fertilizantes ha tomado, con gran impulso, el marco de las buenas prácticas de su uso en comunión con las buenas prácticas agrícolas. El producto correcto, en la dosis adecuada, colocado correctamente y en el momento preciso, define el espíritu de estas buenas prácticas. Combinaciones que variarán entre los diferentes países pero comparten el objetivo común de hacer la producción no sólo sustentable económicamente sino también ambientalmente.

Es coincidente esta revisión con las crisis de los *comodities* que está afectando la última década de este nuevo siglo. Países fuertemente dependientes de los fertilizantes para su economía y sin espacio para derroches, impulsan la investigación agrícola buscando incrementar la eficiencia de aprovechamiento de los nutrientes por los cultivos.

La comprensión de este cúmulo de conocimientos, que los ha transformado en información aplicada, no concluye aquí. Se avanza en la creación de herramientas de soporte de decisiones, como la determinación de requerimiento de agua (CROPWAT, Smith, 1990) o de fertilizantes (NUMASS, Osmond *et al.*, 2002), así como programas que modelan y simulan la productividad y rendimiento de soja, (DSSAT), integrando escenarios climáticos y de suelo con los agronómicos definidos por el usuario para evaluar el impacto de distintas prácticas. Por otro lado, se avanza en la comprensión de muchos fenómenos como la interacción entre enfermedades y nutrición vegetal a nivel molecular, amén del constante desarrollo del mejoramiento genético, que pronto conducirá a variedades tolerantes a la sequía. Esperamos que la próxima actualización de este boletín comprenda todos estos avances.

## 6. Referencias citadas y recomendadas

- AAPRESID - Asociación Argentina de Productores de Siembra directa. 2009. [www.aapresid.org.ar/institucional\\_sd.asp](http://www.aapresid.org.ar/institucional_sd.asp) Acceso Enero 2009.
- ABIOVE. 2009. Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais. [www.abiove.com.br](http://www.abiove.com.br). Acceso Enero 2010.
- Adams, M.L., W.A. Norvell, W.D. Philpot y J.H. Peverly. 2000. Toward the discrimination of manganese, zinc, copper, and iron deficiency in "Bragg" soybean using spectral detection methods. *Agron. Jour.* 92(2):268-274.
- Ahmed, S. y H.J. Evans. 1961. The essentiality of cobalt for soybean plants grown under symbiotic conditions. *Proc. Natl. Acad. Sci. US.* 47(1):24-36.
- Alcarde, J.C. 1992. Corretivos da acidez dos solos: características e interpretações técnicas. 2ed. São Paulo: Anda, 1992. 26 p. *Bol. Técnico*, 6.
- Alvarez, R., J.H. Lemcoff y A.H. Merzari. 1995. Balance de nitrogeno en un suelo cultivado con soja. *Ciencia del Suelo* 22:48-51.
- Alloway, B.J. 2008. Zinc in Soils and Crop Nutrition. IFA, Paris.
- Amado, T.J.C., M.M. Cubilla, J.A. Schleindwein, A.L. Santi y L.E. Cubilla. 2006. Manejo del suelo para la obtención de altos rendimientos en soja en el sistema de siembra directa en Paraguay y en el sur del Brasil. *Informaciones Agronómicas* N° 10. INPOFOS.
- Amarante, L. y L. Sodek. 2006. Waterlogging effect on xylem sap glutamine of nodulated soybean. *Biol. Plant.* 50:405-410.
- Ames, K.A, S.A. Ebelhar, K.L. Barber y W.L. Pedersen. 2000. Soybean and Wheat Responses to Chloride in Potassium Chloride Fertilizers for Suppression of Disease. *Illinois Fertilizer Conference Proceedings* January 24-26, 2000, Urbana - Champaign, IL, EE.UU.
- Amtmann, A., J.P. Hammond, P. Armengaud y P.J. White. 2006. Nutrient sensing and signaling in plants: Phosphorus and potassium. *Advances in Botanical Research. Incorporating advances in Plant Pathology* Vol. 43:209-288.
- Amtmann, A., S. Troufflard y P. Armengaud. 2008. The effect of potassium nutrition on pest and disease resistance in plants. *Physiologia Plantarum* 133(4):682- 691.
- ANDA. 1987. Acidez do Solo e Calagem. *Bol. Téc.1. ANDA.* São Paulo. 16 p.
- Andriani, J.M., Andrade, F.A., Suero, E.E. y J.L. Dardanelli. 1991. Water deficit during reproductive growth of soybeans. I. Their effect on dry matter accumulation, seed yield and its components. *Agronomie* 11:737-746.
- Anghinoni, I., J. Schindwein y M. Nicolodi. 2003. Manejo del fósforo en siembra directa en el sur de Brasil: Variabilidad de fósforo y muestreo de suelo. *Actas Simposio "El fósforo en la agricultura argentina". INPOFOS Cono Sur.* Acassuso, Buenos Aires, Argentina. p. 20-26.

- Arias, N., J. De Batista y C. Cattáneo. 2007. Fertilización foliar en soja. *En: Cultivo de soja en el centro este de Entre Ríos. Resultados 2006/07. Boletín Técnico - Serie Prod. Vegetal N° 48. INTA EEA C. del Uruguay.*
- ASAGA - Asociación Argentina de grasas y aceites. 2009. <http://www.asaga.org.ar/> Acceso Enero 2009.
- Baigorri, H.E. 1997. Ecofisiología del cultivo. Cap. 2. *En: El Cultivo De La Soja En Argentina. Giorda, L.M. y H.E.J. Baigorri (ed.) INTA. 1997.*
- Banco Mundial. 2010. Estadísticas de países del Banco Mundial. <http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/COUNTRIES/0,,pagePK:180619~theSitePK:136917,00.html> Acceso Enero 2010.
- Barbagelata, P., R. Melchiori y O. Paparotti. 2000. Fertilización fosfatada del cultivo de soja en suelos vertisoles de la provincia de Entre Ríos. INTA, EEA Paraná. [www.inta.gov.ar/parana](http://www.inta.gov.ar/parana) Acceso Enero 2009.
- Barbagelata, P.A. y R.J.M. Melchiori. 2008. Evaluación de la fertilización foliar con macro y micronutrientes en soja. Actas CD XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. P Funes, San Luis. AACs.
- Bataglia, O.C. y H.A.A Mascarenhas. 1982. Nutrição mineral da soja. *En: Fundação Cargill (ed.). A Soja No Brasil Central (2.ed). Campinas, 1982. p.115-133.*
- Bauer, W.D. 1981. Infection of legumes by Rhizobia. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 32, 407-449.
- Benites, V.M., V.R. Tannus, J.F. Menezes, G.A. Simon, K.A. Costa y E.S. Martins. 2009. Avaliação da capacidade de extração de nutrientes por plantas de cobertura adubadas com pó de rocha obtido a partir da brecha alcalina de Santo Antônio da Barra- GO. Goiânia: Centro Tecnológico COMIGO.
- Benites, V.M., M.C.S. Carvalho, A.V. Resende, J.C. Polidoro, A.C.C. Bernardi y F.A. Oliveira. 2010. Potássio, cálcio e magnésio. *En: Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes. Prochnow, L.I., V. Casarin y S.R. Stipp. IPNI 2010. v. 2. p. 134-203.*
- Bergmann, W. 1992. Nutritional Disorders of Plants. Development, visual and analytical diagnosis. W. Bergmann (ed.) VEB. Gustav Fisher Verlag Jena, Stuttgart, New York. 741 p.
- Beutler, A.N., J.F. Centurion, M.A. Centurion, O.S. Freddi, E.L. de Sousa Neto, C.L. Leonel y A.P. da Silva. 2007. Traffic soil compaction of an Oxisol related to soybean development and yield. *Sci. Agric.* (64), n° 6.
- Bianchini, A. 2003. Localización de fósforo en siembra directa. Actas Simposio "El fósforo en la agricultura argentina". INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina. p. 79-82.

- Boer, C.A., R.L. Assis, G.P. Silva, A.J. Braz, A.L. Barroso, A. Cargnelutti Filho y F.R. Pires. 2007. Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura na entressafra em um solo de cerrado. *Pesq. Agrop. Brasileira*, 42(9):1269-1276.
- Boer, C.A., R.L. Assis, G.P. Silva, A.J. Braz, A.L. Barroso, A. Cargnelutti Filho y F.R. Pires. 2008. Biomassa, decomposição e cobertura do solo ocasionada por resíduos culturais de três espécies vegetais na Região Centro-Oeste do Brasil. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, 32(2):843-851.
- Boote, K.J., J.W. Jones, N.B. Pickering y G. Hoogenboom. 1998. The CROPGRO model for grain legumes. p. 99-129. *En: Tsuji, G.Y., G. Hoogenboom y P.K. Thornton. (ed.). Understanding Options for Agricultural Production. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.*
- Bordoli, J.M. y A. Mallarino. 1998. Deep and shallow banding phosphorus and potassium as alternatives to broadcast fertilization for no-till corn. *Agron. J.* 90:27-33.
- Bordoli, J.M., A. Quincke y A. Marchessi. 2004. Fertilización fosfatada de trigo en siembra directa. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Actas CD. AACs, Paraná, Entre Ríos, Argentina.
- Borges, R. y A.P. Mallarino. 2000. Grain yield, early growth and nutrient uptake of no-till soybean as affected by phosphorus and potassium placement. *Agron. J.* 92:380-388.
- Borkert, C.M. 1987. Soja: adubação foliar. Londrina. EMBRAPA-CNPSo.
- Borkert, C.M., J.T. Yorinori, B.S. Corrêa-Ferreira, A.M.R. Almeida, L.P. Ferreira y G.J. Sfredo. 1994. Informações Agronômicas Nº 66,- Junho/94 Seja o doutor da sua soja.
- Borkert, C.M., C.A. Gaudêncio, J.E. Pereira, L.R. Pereira y A. Oliveira Júnior. 2003. Nutrientes minerais na biomassa da parte aérea em culturas de cobertura de solo. *Pesq. Agrop. Brasileira*, 38(1):143-153.
- Bowen, J.E. 1969. Adsorption of copper, zinc and manganese by sugar cane tissue. *Plant Physiol.* 44. p. 255-261.
- Brevedan, R.E., D.B. Egli y J.E. Leggett. 1978. Influence of nitrogen nutrition on flower and pod abortion and yield of soybeans. *Agron. J.* 70:81-84.
- Brevedan, R.E. y D.B. Egli 2003. Short periods of water stress during seed filling, leaf senescence and yield of soybean. *Crop Science* 43:2083-88.
- Brevedan, R.E., M.N. Fioretti, S.S. Baioni, I.R. Palomo y H. Laborde. 2007. Fertilización nitrogenada de soja bajo riego. *Phyton* 76:153-167.
- Brown, J.C. y R.B. Clark. 1977. Copper as essential to wheat production. *Plant and Soil* 48. p. 509-523.
- Brown, L.R. 2006. Plan B 2.0: Rescuing a Planet Under Stress and a Civilization in Trouble. Norton Publisher. Downlable at [http://www.earth-policy.org/index.php?/books/pb2/pb2\\_table\\_of\\_contents](http://www.earth-policy.org/index.php?/books/pb2/pb2_table_of_contents) Acceso Enero 2009.

- Brown, P.H., I. Cakmak y Q. Zhang. 1993. Form and function of zinc in plants. Chap. 7 *En*: Robson, A.D. (ed.). Zinc in Soils and Plants. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. p. 90-106.
- Bundy, L.G. y E.S. Oplinger. 1984. Narrow row spacings increase soybean yields and nutrient removal. *Better Crops Plant Food*, Norcross, v.68. p.16-17.
- Burton, M.G., M.J. Lauer y M.B. McDonald. 2000. Calcium effects on soybean seed production, elemental concentration, and seed quality. *Crop Science* 40:476-482.
- Calonego, J.C., J.S.S. Foloni y C.A. Rosolem. 2005. Lixiviação de potássio da palha de plantas de cobertura em diferentes estádios de senescência após a dessecação química. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 29(1):99-108.
- Calviño, P., H. Echeverría y M. Redolatti. 2000. Estratificación de fósforo en el suelo y diagnóstico de la fertilización fosfatada en trigo en siembra directa. *Actas CD XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. AACs. Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.
- Camberato, J.J. 2001. Manganese Deficiency and Fertilization of Soybeans. Clemson Extension, Clemson Univ. [www.clemson.edu/edisto/Soybean/manganese.pdf](http://www.clemson.edu/edisto/Soybean/manganese.pdf) Acceso nov. 2008.
- Cantarella, H. y J.A. Quaggio. 2000. Interpretação da análise de solo e calagem. II. Encontro Paulista Soja, Anais. p. 35-63. CATI. Campinas.
- CAPECO. 2009. Cámara Paraguaya de Exportadores de Cereales y Oleaginosas. [www.capeco.org.py](http://www.capeco.org.py). Acceso Noviembre 2009.
- Casini, C., R.M. Cravioto y S.M. Giancola. 1997. Calidad de la semilla. Cap. 4. *En*: El cultivo de la Soja en Argentina. Giorda, L.M. y H.E.J. Baigorri (ed.) INTA. 1997.
- CFSEMG Comissão de Fertilidade do Solo do estado de Minas Gerais. 1999. Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. 5ª Aproximação. Ribeiro, A.C., Guimarães, P.T.G. y V.H. Alvarez. (ed.); Viçosa. UFV.
- CFS-RS/SC. Comissão de fertilidade do solo. 1994. Recomendação de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 3. ed. Passo Fundo: SBCS-NúcleoRegional Sul.
- Christensen, L.A. 2002. Soil, Nutrient and Water Management Systems Used in U.S. Corn Production. *ERSDA Agriculture Information Bulletin* N° 774.
- Cicore, P.L., H.R. Sainz Rozas, H.E. Echeverría y P.A. Barbieri. 2004. Materia seca nodular y nitrógeno acumulado en un cultivo de soja bajo diferentes condiciones de manejo. *En*: XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo - II Simposio Nacional sobre Suelos Vertisólicos. Quintero, C.E., Boschetti N.G. y E.L. Díaz (ed.), Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Argentina. CD.

- Clark, R.B. y J.C. Brown. 1974. Internal root control of iron uptake and utilization in maize genotypes. *Journal Plant and Soil* 40(3):669-677.
- Clark, R.B. 1982. Iron deficiency in plants grown in the Great Plains of the United States. *J. Plant Nutr.* 5:251-268.
- Clarkson, D.T. y J. Sanderson. 1978. Sites of absorption and translocation of iron in barley roots. Traces and microautoradiographic studies. *Plant Physiol.* 61:731-736.
- Clarkson, D.T. y J.B. Hanson. 1980. The mineral nutrition of higher plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 31. p. 239-298.
- Coale, F.J. y J.H. Grove. 1990. Root Distribution and Shoot Development in No-Till Full-Season and Double-Crop Soybean. *Agron. J.* 82:606-612.
- Coelho, M.R., Santos, H.G. Dos, Silva, E.F. da y M.L.D Aglio. 2002. O recurso natural solo. *En: Manzzato, C.V., E. Freitas Júnior y J.R.R. Peres (ed.). Uso Agrícola Dos Solos Brasileiros.* Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. Cap. 1. p. 1-11.
- CONAB. 2009. Companhia Nacional de Abastecimento. Ministério de Agricultura, Pecuária y Abastecimento de Brasil. <http://www.conab.gov.br/conabweb/> Acceso Enero 2010.
- Conti, M.E., A.M. De La Horra, D. Effron y M.P. Gimenez. 1993. Alteraciones producidas en la relación cantidad/intensidad (Q/I) de algunos suelos argentinos afectados por el laboreo continuo. *Agrochimica* 37:150-156.
- Cregan, P.B. y E.E. Hartwig. 1984. Characterization of flowering response to photoperiod in diverse soybean genotypes. *Crop Sci.* 24:659-662.
- Cruzate, G.A. y E. Rivero. 2008. Potasio, Calcio y Magnesio. Mapas de disponibilidad en distintos suelos de la Republica Argentina. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Actas CD. AACCS. Potrero de los Funes, San Luis.
- Cubilla Andrada, M.M. 2005. Calibración visando recomendações de fertilización fosfatada para as principais culturas de grãos sob sistema plantio direto no Paraguai. 2005.160f. Dissertación (Mestrado) - PPGCS, Univ. Fed. de Santa Maria, Santa Maria.
- Dardanelli, J.L., E.E. Suero, F.A. Andrade y J.M. Andriani. 1991. Water deficit Turing reproductive growth of soybeans. II. Water use and water deficiency indicators, I. Their effect on dry matter accumulation, seed yield and its components. *Agronomie* 11:747-756.
- Dantoff, L., W. Elmer and D. Huber (ed.). 2007. Mineral Nutrition and Plant Diseases. St paul, MN: APS press.
- Demaria, I.C. 2000. Aplicação de calcário em superficie. II Encontro Paulista de Soja, Anais. p. 65 -76. CA TI. Campinas.

- Derpsch, R. 2001. Frontiers in Conservation Tillage and Advances in Conservation Practice. p. 248-254. *En*: Stott, D.E., R.H. Mohtar y G.C. Steinhardt (ed.). 2001. Sustaining the Global Farm. Selected papers from the 10th International Soil Conservation Organization Meeting held May 24-29, 1999 at Purdue University and the USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory. <http://www.rolfderpsch.com/notill.htm#21>.
- Díaz Zorita, M., F. García y R. Melgar (coord.). 2002. Fertilización en soja y trigo-soja: Respuesta a la fertilización en la región pampeana. Boletín Proyecto Fertilizar. EEA, INTA Pergamino.
- Díaz Zorita, M. 2006. Impacto de impacto de la fertilidad del suelo sobre las enfermedades en el cultivo de soja. 3er Congreso de Soja del Mercosur. Rosario 27 al 30 de junio 2006.
- Díaz, M.G., W. Kootel, R. López, O. Caviglia, H. Peltzer y E. Blanzaco. 2008. Evaluación de diferentes proporciones de maíz-soja en intercultivo en surcos. EEA Paraná. Ago 2008. [http://www.inta.gov.ar/parana/info/documentos/produccion\\_vegetal/maiz/evaluacion\\_manejo/10214\\_0808\\_22\\_eval.htm](http://www.inta.gov.ar/parana/info/documentos/produccion_vegetal/maiz/evaluacion_manejo/10214_0808_22_eval.htm) Acceso Enero 2009.
- Dilworth, M.J., A.D. Robson y D.L. Chatel. 1979. Cobalt and Nitrogen Fixation in *Lupinus angustifolius* L. II. Nodule Formation and Function, *New Phytologist* 83:63-79.
- Dugger, W.M. 1983. Boron in plant metabolism. *En*: Inorganic Plant Nutrition, *Encycl. Plant Physiol. New Series* Vol. 15B. A. Lauchli y R.L. Bielecki (ed.). p. 626-650. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo.
- Echeverría, H. y F. García. 1998. Guía para la fertilización fosfatada de trigo, maíz, girasol y soja. Boletín Técnico N° 149. EEA, INTA Balcarce. Buenos Aires, Argentina.
- Echeverría, H., F. Gutiérrez Boem y G. Ferraris. 2003. Soja: Respuesta a la fertilización en el área sojera Argentina. Resultados campañas 2000-01 y 2001-02 de la red de ensayos del proyecto Fertilizar-INTA. INTA 2003.
- Egli, D.B. y I.F. Wardlaw. 1980. Temperature response of seed growth characteristics of soybeans. *Agron. J.* 72:560-564.
- Egli, D.B. y D.M. Tekrony. 1995. Soybean seed germination, vigor and field emergence. *Seed Science & Technology*, v. 23. p. 595- 607.
- EMBRAPA-Centro Nacional de Pesquisa de Soja 1998. Recomendações técnicas para a cultura da soja na região central do Brasil 1998/99. Londrina: EMBRAPA-CNPSo.
- EMBRAPA. 1999. Centro Nacional de Pesquisa em Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos.
- Espoturno, G. 2005. Productividad y sostenibilidad en suelos bajo siembra directa. Un enfoque desde la Extensión Rural. EEA, INTA Marcos Juárez.



- Evans, H.J. y G.J. Sorger. 1966. Role of mineral elements with emphasis on the univalent cations. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 17. p. 47-77.
- FAO. 1999. BOLIVIA. Hacia una estrategia de fertilizantes. Proyecto Manejo de Suelos y Nutrición Vegetal en Sistemas de Cultivos GCPF/BOL/018/NET - "Fertisuelos". FAO, Roma.
- FAO. 2004a. Fertilizer use by crops in Argentina. Roma, Italia.
- FAO. 2004b. Fertilizer use by crops in Brazil. Roma, Italia.
- FAO. 2010. Estadísticas. AgroStat. <http://faostat.fao.org/default.aspx>. Acceso Abril 2010.
- Fernández Canigia, M.V. y M. Díaz-Zorita. 2008. Fijación simbiótica de nitrógeno. Cap 8. p. 161-174. *En: R. Melgar y M. Díaz Zorita (ed.) Fertilización de Cultivos y Pasturas.* 2da ed. Hemisferio Sur, Buenos Aires.
- Fernández, F.G. 2006. Potassium acquisition by soybean affected by stratified soil potassium, growth stage, and soil water content. Thesis PhD Purdue Univ.
- Ferraris, G.N. 2004. Pautas para el diagnóstico de la fertilidad azufrada en soja. Tesis MSc. EPG-FAUBA.
- Ferraris, G.N. y L.A. Couretot. 2005. Evaluación de fertilizantes foliares en soja de primera. INTA Proyecto Regional Agrícola (CRBN, EEA Pergamino y General Villegas), Soja Resultados Experimentales. 2004-2005. p. 73-79.
- Ferraris, G.N. y L.A. Couretot. 2007. Evaluación de la fertilización complementaria con nitrógeno y boro en soja. Simposio Tecnología de la fertilización. AACs-FAUBA, Buenos Aires, Argentina.
- Fertilizar Asociación Civil. 2006. Informe Anual. [www.fertilizar.org.ar](http://www.fertilizar.org.ar)
- Fixen, P.E. 1993. Crop responses to chloride. *En: Sparks, D.L. (ed.). Advances in Agronomy*, Vol. 50. Academic Press, Inc.
- Fixen, P.E., C.S. Snyder, H.F. Reetz, T. Yamada y T.S. Murrell. 2004. Nutrient Management of Soybeans with the Potential for Asian Rust Infection. *En: http://www.ppi-far.org* Acceso Diciembre 2008.
- Flannery, R.L. 1986. Plant food uptake in a maximum yield soybean study. *Better Crops Plant Food*. Fall 1986. Norcross: PPI/PPIC, 1986. p. 6-7.
- Flannery, R.L. 1989. The use of maximum yield research technology in soybean production. *En: Munson, R.D. (ed.). The physiology, biochemistry, nutrition and bioengineering of soybeans: implications for future management.* PPI/PPIC. p. 160-174.
- Franca Neto, J. de B., N.P. da Costa, A.A. Henning, J.B. Palhano, G.J. Sfredo y C.M. Borkert. 1985. Efeito de doses e métodos de aplicação de cloreto de potássio sobre as qualidades da semente da soja. EMBRAPA Resultados de Pesquisa de Soja. Londrina, PR, Brasil. p. 294-295.
- Franchini, J.C., M. Miyazawa, M.A. Pavan y E. Malavolta. 1999. Dinâmica de íons em solo ácido lixiviado com extratos de resíduos de fertilizantes verdes e soluções puras de ácidos orgânicos. *Pesq. Agropec. Brasil* 34:2267-2276.

- Furlani, A.M.C., R.T. Tanaka, M. Tarallo, M.F. Verdial y H.A.A Mascarenhas. 2001. Exigência a boro em cultivares de soja. *Rev. Brasileira Ciência do Solo* 25(4):929-937.
- Galvão, E.Z. 2002. Micronutrientes. *En: Sousa, D.M.G. De y E. Lobato (ed.). Cerrado: correção do solo e adubação. Planaltina-DF: EMBRAPA Cerrados.* p. 185-226.
- García, F. 2005. Soja. Criterios para el manejo de la fertilización del cultivo. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 27:1-6. INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- García, F. 2006. La nutrición de los cultivos y la nutrición de los suelos. *Informaciones Agronómicas* 29:13-17. INPOFOS Cono Sur. Buenos Aires, Argentina.
- Gentiletti, A. y F. Gutiérrez Boem. 2004. Fertilización azufrada de soja en el centro-sur de Santa Fe. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 24:12-14. INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- George, T., P.W. Singleton y B.B. Bohlool. 1988. Yield, soil nitrogen uptake and nitrogen fixation by soybean from four maturity groups grown at three elevations. *Agron. J.* 80:563-567.
- Gettier, S.W., D.C. Martens y T.B. Brumback. 1985. Timing of Foliar Manganese Application for Correction of Manganese Deficiency in Soybean. *Agron. J.* 77:627-630.
- Giacomini, S.J., C. Aita, A.P. Hübner, A. Lunkes, E. Guidini y E.B. Amaral. 2003. Liberação de fósforo e potássio durante a decomposição de resíduos culturais em plantio direto. *Pesq. Agrop. Brasileira*, 38(9):1097-1104.
- Goldflus, F., M. Ceccantini y W. Santos. 2006. Amino Acid Content of Soybean Samples Collected in Different Brazilian States-Harvest 2003/2004. *Revista Brasileira de Ciência Avícola*. 8(2):105-111.
- González, N. 2000. Como elegir el mejor inoculante comercial. *Fertilizar* N° 20: 6-8.
- Gossett, D.R., D.B. Egli y J.E. Leggett. 1977. The influence of calcium deficiency on the translocation of photosynthetically fixed <sup>14</sup>C in soybeans. *Plant and Soil* 48(1):243-251.
- Graham, R.D. 1981. Absorption of copper by plant roots. *En: Copper in Soils and Plants. Loneragan, J.F., A.D. Robson y R.D. Graham, (ed.).* p. 141-160. Academic Press, 1981.
- Graham, P.H. 1996. Stress tolerance in Rhizobium and Bradyrhizobium, and nodulation under adverse soil conditions. *Can. J. Microbiol.* 38:475-484.
- Guiller, K. 2001. Nitrogen Fixation in Tropical Cropping Systems. CAB International Publishing. USA.
- Gupta, U.C. 1979. Boron in nutrition of crops. *Adv. Agron.* 31:273-307.

- Gutiérrez Boem, F., P. Prystupa y G.N. Ferraris. 2004. Fuentes de S en el cultivo de Soja. p. 54-55. *En*: "Fertilidad 2004". Fertilidad de suelos para una agricultura sustentable, INPOFOS, Rosario.
- Haby, V.A., M.P. Ruselle y E.O. Skogley. 1990. Testing soils for potassium, calcium, and magnesium. *En*: Westerman, R.L. (ed.) Soil testing and plant analysis. SSSA, Madison. p. 181-227.
- Hansen, N.C., M.A. Schmittb, J.E. Andersonc y J.S. Strockd. 2003. Iron Deficiency of Soybean in the Upper Midwest and Associated Soil Properties. *Agron. J.* 95:1595-1601.
- Hanway, J.J. y H.E. Thompson. 1967. How a soybean plants develop. Special Report N° 53. Iowa State Extension, Ames, IO. Updated 1994. Ritchie, S.W., J.J. Hanway, H.E. Thompson y G.O. Benson.
- Hanway, J.J. y C.R. Weber. 1971. N, P, and K Percentages in Soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) Plant Parts. *Agron. J.* 63:286-290.
- Haq, M.U. y A.P. Mallarino. 1998. Foliar fertilization of soybean at early vegetative stages. *Agron. J.* 90:763-769.
- Haq, M.U. y A.P. Mallarino. 2000. Soybean yield and nutrient composition as affected by early season foliar fertilization. *Agron. J.* 92:16-24.
- Harper, J.E. 1971. Seasonal Nutrient Uptake and Accumulation Patterns in Soybeans. *Crop Sci.* 11:347-350.
- Heathery, L.G. y R.W. Elmore. 2004. Managing inputs for peak production. *En*: Boerma, H.R. y J.E. Specht (ed.). Soybeans: Improvement, Production, and Uses, ASA-CSSA-SSAJ, Madison, WI (2004). p. 451-536.
- Hesketh, J.D., G.L. Myhre y C.R. Willey. 1973. Temperature control of the time intervals between vegetative and reproductive events in soybeans. *Crop Sci.* 13:250-254.
- Hirschy Ruiz, A. 2004. Desarrollo del cultivo de soja en Uruguay. [www.acsoja.org.ar/mercosoja2006/Contenidos/Foros/paises\\_02.pdf](http://www.acsoja.org.ar/mercosoja2006/Contenidos/Foros/paises_02.pdf) Acceso Diciembre 2008.
- Hoelt, R.G. y T.R. Peck. 2001. Soil testing and fertility. *En*: Illinois Agronomy Handbook, University of Illinois. p.84-124.
- Hsiao, T.C. y A. Lauchli. 1986. Role of potassium in plant-water relations. p. 281-312. *En*: Advances in Plant Nutrition, Vol. 2, Tinker, B.P. and A. Lauchli (ed.). Praeger, New York.
- Huber, D.M., y D.C. Army. 1985. Interactions of Potassium with plant disease. *En*: Munson, R.D. (ed.), Potassium in Agriculture, ASACSSA-SSSA, Madison (WI, USA). p. 467-488.
- Huber, D.M. y N.S. Wilhelm. 1988. The role of manganese in resistance of plant diseases. *En*: Graham, R.D, R.J. Hannam y N.C. Uren (ed.). Manganese in Soils and Plants. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. p. 155-173.

- Hungria, M., J.C. Franchini, R.J. Campo y P.H. Graham. 2005. The importance of nitrogen fixation to soybean cropping in South America. p. 25-42. *En:* Werner, D. and W.E. Newton (ed.). Nitrogen fixation in agriculture, forestry, ecology and environment. Springer, the Netherlands.
- Hungria, M., J.C. Franchini, R.J. Campo, C.C. Crispino, J.Z. Moraes, R.N.R. Sibaldelli, I.C. Mendes y J. Arihara. 2008. Nitrogen nutrition of soybean in Brazil: Contributions of biological N<sub>2</sub> fixation and N fertilizer to grain yield. *Canadian Journal of Plant Science* 86:927-939.
- IICA. 2009. Produccion de soja. <http://www.iica.org.py/observatorio/producto-paraguay-soja-produccion.htm>. Acceso Marzo 2010.
- INIA. 2008. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca de Uruguay <http://www.inia.org.uy/online/site/33540211.php> Acceso Abril 2009.
- Israel, D.W. 1993. Symbiotic dinitrogen fixation and host-plant growth during development of and recovery from phosphorus deficiency. *Physiol. Plant.* 88:294-300.
- Ivancovich, A. 2005. Soybean Rust in Argentina. *Plant Dis.* 89:667-668.
- Jacoby, B., S. Abas y B. Steinitz. 1973. Rubidium and potassium absorption by bean-leaf slices compared to sodium absorption, *Physiol. Plant.* 28. p. 209-214.
- Jeffers, D.L., A.F. Schmitthenner y M.E. Kroetz. 1982. Potassium fertilization effects on Phomopsis seed infection, seed quality and yield of soybeans. *Agron. J.* 74:886-890.
- Jones, Jr., J.B., B. Wolf y H.A. Mills. 1991. Plant analysis handbook. Micro-Macro Publishing, Georgia, EE.UU.
- Jones, J.W., K.J. Boote, G. Hoogenboom, S.S. Jagtap y G.G. Wilkerson. 1989. SOYGRO V5.42, Soybean Crop Growth Simulation Model. User's guide. Florida Agric. Exp. Stn., Univ. of Florida, Gainesville, FL.
- Kamprath, E.J. 1970. Exchangeable Al as a criterion for liming leached mineral soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34:252-4.
- Kelling, K.A., L.G. Bundy, S.M. Combs y J.B. Peters. 1998. Soil test recommendations for field, vegetable and fruit crops. Univ. of Wisconsin. Ext. Bull. A2809.
- Kiihl, R.A.S. y A. García. 1989. The use of long juvenile trait in cultivar development. Citado por Spehar, C.R., Oliveira Monteiro, P.M.F. y N.L. Zuffo. 1993. Melhoramento genético da soja na regio centro-oeste. p. 229-251. *En:* Cultura da soja nos Cerrados. Arantes, N.E. y P.I. Mello Souza (ed.). Potafos. Piracicaba, Brasil.
- Kitchen, N., J. Havlin y D. Westfall. 1990. Soil sampling under no-till banded phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:1661-1665.

- Kliewer, M. y H.J. Evans. 1963. Cobamide coenzyme contents of soybean nodules and nitrogen fixing bacteria in relation to physiological conditions. *Plant Physiol.* 38:99-104.
- Koller, D. 1990. Light-driven leaf movement. *Plant Cell Environ.* 13:615-632.
- Kubota, B.A., J. Bordon, K. Hoshiba, T. Horita y K. Ogawa. 2005. Change in Physical Properties of "Terra Rossa" Soils in Paraguay under No-tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:1448-1454.
- Lang, A. 1983. Turgor-regulated translocation. *Plant, Cell and Environment* 6:683-689.
- Lima, G.J.M.M. 1999. Importância da qualidade nutricional da soja e de seus subprodutos no mercado de rações: situação atual e perspectivas futuras. *En: Congresso Brasileiro de Soja; 1999; Londrina, PR. Brasil. Londrina: Embrapa Soja. p.165-175.*
- Loneragan, J.F, A.D. Robson y R.D. Graham (ed.). 1981. Copper in Soil and Plants. Academic Press, London, New York y San Francisco.
- Loneragan, J.F. y M.J. Webb, 1993. Interactions between Zinc and other nutrients affecting the growth of plants. Chap 9. *En: Robson, A.D. (ed.) Zinc in soils and plants. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. p. 119-134.*
- Lopes Scheid, A. 1991. Micronutrientes: Filosofias de aplicação, fontes, eficiência agrônômica e preparo de fertilizantes. p. 357-390. *En: Ferreira, M.E. y M.C. Pessoa da Cruz (ed.) Micronutrientes na Agricultura. POTAFOS. Brasil.*
- Lopes Scheid, A. 1996. Soils under Cerrado: A Success Story in Soil Management (Brazil) - Better Crops International. 10(2):9-15.
- MAGyP. 2010. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de Argentina. <http://www.minagri.gob.ar> Acceso Abril 2010.
- Malavolta, E. y H.J. Kliemann. 1985. Desordens nutricionais no Cerrado. Potafos, Piracicaba.
- Malavolta, E. 1992. O gesso agrícola no ambiente e na nutrição da planta - perguntas e respostas. II. Seminário Sobre o Uso do Gesso na Agricultura. p. 41-66. IBRAFOS. São Paulo. 413 p.
- Malavolta, E. y J.C.F. Santos. 1996. Efficiency of the use of nutrients in acid soils -management of soil, fertilizer and crop. CENA -USP. Piracicaba. 100 p. Malavolta, E. (Coord.). 1983. Seminário sobre Corretivos Agrícolas. Fundação Cargill. Campinas. 358 p.
- Malek, F. y D.A. Baker. 1977. Proton co-transport of sugars in phloem loading. *Planta* 135:297-299.
- Malik, S.A., H.E. Calvert y W.D. Bauer. 1987. Nitrate induced regulation of nodule formation in soybean. *Plant Physiol.* 84:266-271.
- Mallarino, A.P. y A.M. Blackmer. 1992. Comparison of methods for determining critical concentrations of soil test phosphorus for corn. *Agron. J.* 84:850-856.

- Mallarino, A.P. 2001. Manejo de la fertilización con fósforo y potasio para maíz y soja en el centro-oeste de los Estados Unidos. *En: Jornada de Actualización Técnica para Profesionales "Fertilidad 2001"*. INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2<sup>nd</sup> ed. Academic Press. London.
- Martelotto, E., P. Salas y E. Lovera, E. 2001. Impacto del monocultivo de soja. <http://www.inta.gov.ar/manfredi/info/documentos/docsuelos/impamonosoja.htm>.
- Martínez, F. y G. Cordone. 1998. Fertilización azufrada en soja. Jornadas de Azufre. UEEA-INTA Casilda, Santa Fe, Argentina.
- Martínez, F. y G. Cordone. 2000. Avances en el manejo de azufre: Novedades en respuesta y diagnóstico en trigo, soja y maíz. In *Jornada de Actualización Técnica para Profesionales "Fertilidad 2000"*. INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- Martínez, F. y G. Cordone. 2003. Fertilización en soja de primera y en trigo-soja de segunda en la región pampeana norte. *En: Satorre, E. (ed.). El Libro de la Soja*. SEMA. Buenos Aires, Argentina.
- Mascarenhas, H.A.A., M.A.C. Miranda, O.C. Bataglia, J.C. Pereira y R.T. Tanaka. 1988. Deficiencia de boro en soja. *Bragantia* 47(2):325-331.
- Mascarenhas, H.A.A., M.A.C. Miranda y R.T. Tanaka. 1992. Colapso do peciolo em folhas de soja. *Pesq. Agrop. Brasileira* 27(2)343-348.
- Mascarenhas, H.A.A. y R.T. Tanaka. 1996. Soja. *En: Raij, B. van, H. Cantarella, J.Á. Quaggio y A.M.C. Furlani (ed.) Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Boletim Técnico N° 100*. IAC, FUNDAG. Campinas, Brasil. p. 202-203.
- Mascarenhas, H.A.A., R.T. Tanaka, E.B. Wutke, N.R. Braga y M.A.C. de Miranda. 2004. Potássio para a soja. *Informações Agronômicas* 105:1-2.
- McClure P.R. y D.W. Israel. 1979. Transport of Nitrogen in the Xylem of Soybean Plants. *Plant Physiol.* 64:411-416.
- Melgar, R.J., E. Frutos, M.L. Galetto y H. Vivas. 1995. El análisis de suelo como predictor de la respuesta de la Soja a la fertilización fosfatada. *En: Actas I Congreso Nacional de Soja y II Reunión Nacional de Oleaginosas. Tomo I. p. 167-174*.
- Melgar, R.J., M.E. Camozzi, M. Torres Duggan y J. Lavandera. 2003. Concentración de nutrientes en soja. Valores promedios. *Fertilizar N° 32*.
- Melgar, R.J. 2006. Fertilizantes con micronutrientes en el mercado argentino. p. 167-175. *En: Vazquez, M.B. (ed.) Micronutrientes en la Agricultura*. AACs. Buenos Aires. Argentina.
- Melgar, R.J. 2009. How much more can South America farmers pay for fertilizers. *Fertilizantes Latinoamerica*. Panama City, Panama. January 18-20.

- Melgar, R.J., M. Díaz Zorita, M. Torres Duggan y J. Lavandera. 2009a. Effects of nitrogen fertilizer on N<sub>2</sub> fixation in different soybean growth stages. En revisión.
- Melgar, R.J., M. Torres Duggan, J. Lavandera y M.E. Camozzi. 2009b. Elemental Sulfur as suitable fertilizer for wheat soybean sequences in Argentina. En revision.
- Mello Filho, O.L., C.S. Sedyama, M.A. Moreira, M.S. Reis, G.A. Massoni y N.D. Piovesan. 2004. Grain yield and seed quality of soybean selected for high protein content. *Pesq. Agropec. Brasileira*. Brasília 39(5):445-450.
- Mengel, K. y R. Pflüger. 1972. The release of potassium and sodium from young excised roots of *Zea mays* under various efflux conditions. *Plant Physiol.* 49. p.16-19.
- Mengel, K. y E.A. Kirkby. 1987. Principles of Plant Nutrition. IPI. Berna. Suiza. 687 p.
- Mengel, K. y W.W. Arneke. 1982. Effect of potassium on the water potential, the pressure potential, the osmotic potential and cell elongation in leaves of *Phaseolus vulgaris*. *Physiol. Plant.* 54:402-408.
- Meurer, E.J., G.M. Wang, y S.R. Wang. 1981. Função dos nutrientes e sintomas de deficiências. pp. 156-167. *En: Miyasaka, S. y J.C. Medina. (ed.) A soja no Brasil. Instituto Tecnológico de Alimentos. Campinas, SP, Brasil.*
- MGAP. 2009. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca de Uruguay. <http://www.mgap.gub.uy/Diea/default.htm> Acceso Enero 2009.
- Milanez, de R.P., C. Fortes, J.G. Carvalho, L.L. Gomes y L. Bottino. 2005. Adubação foliar. I. Epocas de aplicação de fósforo na cultura da soja. *Ciênc. agrotec., Lavras* 29(6):1105-1111. <http://www.scielo.br/pdf/cagro/v29n6/v29n6a01.pdf> Acceso Enero 2009.
- Milthorpe, F.L. y J. Moorby. 1969. Vascular transport and its significance in plant growth. *Annual Review of Plant Physiology* .20:117-138.
- Miyazawa, M., M.A. Pavan y J.C. Franchini. 2000. Neutralização da acidez do perfil do solo por resíduos vegetais. *Info. Agronômica (Piracicaba)* n° 92, Enc. Téc.: 1-8.
- Moniz, A.C., A.M.C. Furlani, R.E. Schaffert, N.K. Fageria, C.A. Rosolem y H. Cantarella (ed.). 1997. Plant -Soil Interactions at low pH: Sustainable Agriculture and Forestry Production. Brazilian Soil Science Society. Campinas / Viçosa. 314 p.
- Moscatelli, G. y M.I. Puentes. 1998. Suelos Argentinos. *En: Conti, M. (Coord.) Principios de Edafología con énfasis en suelos argentinos.* p. 334-350. 1ra. ed., Orientación Gráfica Editora. Buenos Aires, Argentina.
- Nable, R.O., G.S. Bañuelos y J.G. Paull. 1997. Boron toxicity. *Plant and Soil* 193:181-198.
- Naeve, S.L. y R.M. Shibles. 2005. Distribution and mobilization of sulfur during soybean reproduction. *Crop Sci.* 45:2540-2551.

- Nahass, S. y J. Severino. 2005. Calcáreo agrícola no Brasil. p. 375-380. *En:* Nelson, H. y R. Sarudiansky (ed.) *Minerales para la Agricultura en Latinoamerica*. UNSAM. Buenos Aires Argentina.
- Neales, T.F. 1956. Components of the total magnesium content within the leaves of white clover and perennial rye grass. *Nature* 177:388-389.
- Nelson, W.L. y S.A. Barber. 1964. Nutrient deficiencias in legumes for grain and forage. p. 143-180. *En:* Sprague, H.B. (ed.). *Hunger signs in crops*. 3er. ed. David McKay. New York.
- Nill, K. 2005. U.S. Soybean production is more sustainable than ever before. <http://www.asaim-europe.org/pdf/sustainable.pdf> Acceso Enero 2009.
- Ohki, K. 1976. Manganese deficiency and toxicity levels for "Bragg" soybeans. *Agron. J.* 68:861-864.
- Oplinger, E.S., R.G. Hoefl, J.W. Johnson y P.W. Tracy. 1993. Boron fertilization of soybean: A regional summary. p. 7-16. *En:* 1993,. Res. Symp. Proc., Fluid Fertilizer Foundation, Scottsdale, AZ.
- Osaki, M., K. Morikawa, K. Shinano, M. Urayama y T. Tadano. 1991. Productivity of high yielding crops. II. Comparison of N, P, K, Ca and Mg accumulation and distribution among high-yielding crops. *Soil Science and Plant Nutrition*, 37(3):445-454.
- Osmond, D.L., T.J. Smyth, R.S. Yost, D.L. Hoag, W.S. Reid, W. Branch, X. Wang y H. Li. 2002. Nutrient Management Support System (NuMaSS) v. 2. Soil Management Collaborative research Support Program, Technical bulletin N° 2002- 02, North Carolina State University, Raleigh, NC.
- Pavan, M.A. 1983. Ação dos corretivos e fertilizantes na dinâmica de íons no solo. *Curso Atualização em Fertilidade do Solo*. p. 47-64. IAPAR, ANDA, PPI/IPI. Londrina. 330 p.
- Peoples, T.R y D.W. Koch. 1979. Role of potassium in carbon dioxide assimilation in *Medicago sativa* L. *Plant Physiol.* 63:878-881.
- Perticari, A. 2004. Impacto de la fijación biológica de nitrógeno en la producción de soja. *Fertilizar* N°. 34.
- Piccio, V.L. y N.S. Franje. 1980. Rust incidence in soybean (*Glycine max* L. Merr.) as affected by varying levels of NPK applied alone and in combination. *Soybean Rust Newsletter* 3:18-22.
- Pinazza, L.A. 2007. Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Cadeia produtiva da soja / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretaria de Política Agrícola, Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura; coordenador Luiz Antonio Pinazza-Brasília : IICA : MAPA/SPA, 2007. (Agronegócios; v. 2).
- Ploper, L.D., A. Chavarría, I. Zarzosa, C.G. Díaz y J.C. Ramallo. 1995. Efectos del sistema de labranza, la rotación de cultivos y la fertilización fosforada sobre las enfermedades de soja en Tucumán, Argentina. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán* 72:87-98.



- PPI. Potash and Phosphate Institute. 1998. Effects of potassium on plant diseases. *En: Potassium for Agriculture*, Potash & Phosphate Institute, Norcross, GA. p. 37-39.
- Quaggio, J.A. 2000. Acidez e Calagem em Solos Tropicais. Instituto Agronômico. Campinas. 111 p.
- Quispel, A. 1983. Dinitrogen-fixing symbioses with legumes, non-legumes angiosperms and associative symbioses. *En: Läuchli, A. y R.L Bielecki (ed.). Inorganic Plant Nutrition. Encycl. Plant Physiol. New Series Vol. 15A.* p. 286-329, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo.
- Racca, R.W. 2000. Inoculación. El socio silencioso. *Fertilizar N° 20:8-11.*
- Raij, B. van, O.C. Bataglia y N.M. Silva. 1983. Acidez e Calagem no Brasil. *Soc. Bras. Ci. Solo. Campinas.* 361 p.
- Raij, R. van, B. Cantarella, J.A. Quaggio y A.M.C. Furlani (ed.). 1996. *Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo. Inst. Agronômico Bol. Téc. 100, 2ª ed. Campinas.*
- Randall, G.W. y R.B. Corey. 1975. Effect of soil and foliar-applied manganese on the micronutrient content and yield of soybeans. *Agron. J. 67:502-507.*
- Randall, G.W., T.K. Iragavarapu y S.D. Evans. 1997. Long Term P and K applications: I. Effect on Soil test incline and decline rates and critical soil test levels. II. Effect on corn and soybean yields and P and K concentrations. *J. Prod. Agric. 10(4):565-571 y 572-580.*
- Raven, J.A. 1980. Short- and long distance transport of boric acid in plants. *New Phytol. 84:231-249.*
- Rehm, G., M. Schmitt y R. Munter. 1994. *Fertilizing soybeans in Minnesota. University of Minnesota Extension Service, FS-3813-GO.*
- Rerkasem, B., R.W. Bell, S. Lodkaew y J.F. Loneragan. 1997. Relationship of seed boron concentration to germination and growth of soybean (*Glycine max*). *Nut. Cycl. Agroecosystems 48(3):217-223.*
- Ribeiro, A.C., P.T.G Guimarães y V.H. Alvarez V. 1999. *Recomendação para o Uso de Corretivos e Fertilizantes em Minas Gerais – 5ª aproximação. CFSEMG. Viçosa.* 359 p.
- Ritchie, S.W., J.J. Hanway, H.E. Thompson y G.O. Benson. 1997. How a soybean plant develops. *Spec. Rep. 53. Iowa State Univ., Coop. Ext. Serv., Ames.*
- Römheld, V. y M.M. El-Fouly. 1999: Foliar nutrient application: challenge and limits in crop production. *Proc. of the 2nd International Workshop on Foliar Fertilization, April 4-10, 1999. Bangkok, Thailand.* p. 1-34.
- Rosolem, C.A. 1984. Adubação foliar. p. 419-449. *En: Simpósio sobre fertilizantes na agricultura brasileira. Anais EMBRAPA, Brasília, Brasil.*
- Rosolem, C.A., A.M. Bessa y H.F.M. Pererira. 1993. Dinâmica do potássio no solo e nutrição potássica da soja. *Pesq. Agrop. Brasileira 28(9):1045-1054.*

- Rosolem, C.A., J.C. Calonego y J.S.S. Foloni. 2003. Lixiviação de potássio da palha de espécies de cobertura de solo de acordo com a quantidade de chuva aplicada. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 27(2):355–362.
- Rosolem, C.A. y C.A. Tavares. 2006. Sintomas de deficiência tardia de fósforo em soja. *R. Bras. Ci. Solo* 30:385-389.
- Rossa, J.R., N.A. Slaton, K.R. Bryeb y R.E. DeLonga. 2006. Boron fertilization influences on soybean yield and leaf and seed boron concentrations. *Agron. J.* 98:198-205.
- Rubione, C., P. Hernández y E. Tronfi. 2002. Fertilización de soja en la provincia de Córdoba. Resultados.
- Sa, T.M. e D.W. Israel. 1991. Energy status and functioning of phosphorus-deficient soybean nodules. *Plant Physiol.* 97:928-935.
- Sá, J.C.M. 1999. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto. *En: Siqueira, J.O., F.M.S. Moreira, A.S. Lopes, L.R.G. Guilherme, V. Faquin, A.E. Furtini Neto y J.G. Carvalho (ed.). p. 267-320. Soil fertility, soil biology, and plant nutrition interrelationships. Soc. Bras. Ci. Solo. UFLA, Lavras, MG, Brasil.*
- Salvagiotti, F., K.G. Cassman, J.E. Specht, D.T. Walters, A. Weiss y A. Dobermann. 2008. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. *Field Crop Research* 108:1-13.
- Samimy, C. 1978. Influence of cobalt on soybean hypocotyl growth and its ethylene evolution. *Plant Physiol.* 62:1005-1006.
- Sch lindwein, J.A. 2003. Calibração de métodos de determinação de fósforo e potássio do solo sob sistema plantio direto. 2003. Tese (Doutorado)-PPGCS, Univ. Fed. Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Schon, M.K. y D.G. Blevins. 1990. Foliar boron applications increase the final number of branches and pods on branches of field-grown soybeans. *Plant Physiol.* 92:609-607.
- Seki, Y. 1999. Soybean production under no-tillage in Paraguay. *Agric. Hortic.,* 74:1080-1084.
- Sfredo, G.J., A.F. Lantmann, R.J. Campo y C.M. Borket. 1986. Soja, nutrição mineral, adubação e calagem. Londrina, Embrapa-CNPSo, 1986. 51 p. (Documentos Embrapa, 64).
- Shah, V.A., R.A. Ugalde, J. Imperial y W.J. Brill. 1984. Molybdenum in nitrogenase, *Annu. Rev. Biochem.* 53:231-257.
- Sinclair, T.R. y C.T. deWit, 1975. Comparative analysis of photosynthate and N requirements in the production of seeds by various crops. *Science* 189:565-567.
- Sinclair, T.R. y C.T. deWit, 1976. Analysis of the carbon and nitrogen limitation to soybean yield. *Agron. J.* 68:319-324.

- Siqueira, O.J.F., E.E. Scherer, G. Tassinari, I. Anghinoni, J.F. Patella, M.J. Tedesco, P.A. Milan y P.R. Ernani. 1987. Recomendações de adubação e calagem para os Estados do R o Grande do Sul e Santa Catarina. Passo Fundo, Centro Nacional de Pesquisa do Trigo, EMBRAPA.
- Small, H.G. Jr. y A.J. Ohlrogge, 1973. Plant analysis as an aid in fertilizing soybeans and peanuts. *En: Walsh, L.M. y J.D. Beaton (ed.). Soil Testing and Plant Analysis. Madison: SSSA. p. 315-327.*
- Smith, M. 1990. CROPWAT- a computer program for irrigation planning and management. FAO Irrigation and Drainage Paper N  46. FAO, Rome, Italy. 126.
- Soil Survey Staff. 2010. Keys to Soil Taxonomy, 11<sup>th</sup> ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Sousa, D.M.G., E. Lobato y L.N. Miranda. 1993. Corre o do solo e aduba o da cultura da soja. p. 137-158. *En: Arantes, N.E. y P.I. de M. Souza (ed.). Cultura da soja nos Cerrados. Piracicaba: POTAFOS.*
- Sousa, D.M.G., E. Lobato y M.A. Rein. 2005. Uso de gesso agr cola nos solos do Cerrado. Circular T cnica n  32. Embrapa Cerrados. Embrapa.
- Souza, D.M.G., L.N. Miranda y E. Lobato. 1997. Interpreta o de an lise de terra e recomenda o de fertilizantes fosfatados para as culturas anuais nos cerrados. Planaltina: EMBRAPA/CPAC. 7 p. (Comunicado t cnico 51).
- Spehar, C.R., P.M.F. Oliveira Monteiro y N.L. Zuffo. 1993. Melhoramento gen tico da soja na regio o centro-oeste. p. 229-251. *En: Cultura da soja nos Cerrados. Arantes, N,E y P. I. Mello Souza (ed.). Potafos. Piracicaba, Brasil.*
- Srivastava, P.C. y U.C. Gupta. 1996. Trace elements in crop production. Science Publishers, Lebanon, NH.
- Stipp, S.R. y L.I. Prochnow. 2008. Panorama Atual do Setor de Fertilizantes Fluido e Foliare. Informa es Agron micas N  123. Setembro 2008. Pozzan, G. Panorama da aduba o foliar: Mercado Produ o e log stica. II Simp sio Brasileiro de Fertilizantes Fluidos e Foliare.
- Streeter, J.G. 1979. Allantoin and allantoic acid in tissues and stem exudate from field-grown soybean plants. *Plant Physiol.* 63(3):478-480.
- Suelter, C.H. 1970. Enzymes activated by monovalent cations. *Science* 168:789-795.
- Summerfield, R.J. y J.R. Wilcox, 1978. Effects of photoperiod and air temperature on growth and yield of economic legumes. *En: Summerfield, R.J. and A.H. Bunting (ed.). Advances in Legume Sciences, Royal Botanic Gardens, Kew, England. p. 17-36.*
- Sunarpi y J.W. Anderson. 1997. Allocation of S in Generative Growth of Soybean. *Plant Physiol.* 114:687-693.
- Suzuki, S. y M.M. Yuyama. 2004. Nutri o e Aduba o. Funda o MT, Boletim de pesquisa de soja n  8.

- Taboada, R. 2006. Main Crops and Fertilization Practices in the Tropical Savannas of Bolivia. IPI-EMBRAPA Solos Symposium on "Potash in Agricultural Systems of Tropical Savannas of South America: Adequate Fertilizing Practices in Areas with Poor Soils", Bonito MS, Brazil.
- Tanaka, R.T., A.A. Mascarenhas y C.M. Borkert. 1993. Nutrição mineral da soja. p.105-135. *En:* Arantes, N.E. y P.I. de M. Souza (ed.). Cultura da soja nos Cerrados. Piracicaba: POTAFOS.
- Terrazas, J.B. y J. Roca. 2007. Avances de ensayos en fertilización de suelos y nutrición de cultivos. *En:* Ruiz, H., P. Román y L. Urzagaste (ed.). Fundacruz, Manual de difusión técnica de soja. p. 91-95.
- Thomas, J.F. y C.D. Raper. 1978. Effect of day and night temperatures during floral induction on morphology of soybeans. *Agron. J.* 70:893-898.
- Thomas, A.L. y L. Sodek. 2006. Amino acid and ureide transport in the xylem of symbiotic soybean plants during short-term flooding of the root system in the presence of different sources of nitrogen Braz. *J. Plant Physiol.* vol.18 n°.2 Londrina Apr. June 2006.
- Tyler, D.D y D.D. Howard. 1991. Soil sampling patterns for assessing no-tillage fertilization techniques. *J. Fert. Issues* 8:52-56.
- Tysko, M.B. y M.B. Rodríguez, 2006. Respuesta de trigo-soja en doble cultivo a la fertilización con azufre elemental pretratado. *Cienc. Suelo* 24(2):139-146.
- Vargas, M.A.T. y A.R. Suhet. 1982. Adubação nitrogenada inoculação e épocas de calagem para a soja em um solo sob Cerrado. *Pesq. Agrop. Brasileira* 17(8):1127-32.
- Vernetti, F.J. 1983. Bases fisiológicas da produção e nutrição. p. 877-990. *En:* Vernetti, F.J. (ed.) Soja, genética e melhoramento. Fundação Cargill. Campinas, SP, Brasil.
- Vessey, J.K. y J. Waterer. 1992. In search of the mechanism of nitrate inhibition of nitrogenase activity in legume nodules: recent developments. *Physiologia Plantarum* 84:171-176.
- Vitosh, M.L., J.W. Johnson y D.B. Mengel. 1995. Tri-state fertilizer recommendations for corn, soybeans, wheat and alfalfa. Extension Bulletin E-2567, Michigan State University, The Ohio State University, Purdue University. <http://ohioline.osu.edu/e2567/index.html>.
- Vitti, G.C. y E. Malavolta, 1985. Fosfogesso -uso agrícola. Seminário Sobre orretivos Agrícolas. p. 161-204. E. Malavolta, coord. Fundação Cargill. Campinas. 357 p.
- Vitti, G.C. y P.H.C. Luz. 2001. Utilização Agronômica de Corretivos Agrícolas. FEALQ. Piracicaba. 96 p.
- Voss, R.D., J.E. Sawyer, A.P. Mallarino y R. Killorn. 1999. General guide for crop nutrient recommendation in Iowa. University extension, Iowa State University, PM 1688.

- Warembourg, F.R. y M.P. Fernández. 2006. Distribution and remobilization of symbiotically fixed nitrogen in soybean (*Glycine max*). *Physiologia Plantarum* 65(3):281-286.
- Welch, R.M. 1995. Micronutrient nutrition of plants. *Critical reviews in Plant Science* 14:49-82.
- Wendling, A. 2005. Recomendación de nitrogenio e potassio para trigo, milho e soja sob sistema plantio direto no Paraguai. 160f. Dissertación (Mestrado)-PPGCS, Univ. Fed. de Santa Maria, Santa Maria.
- Wesley, T.L., R.E. Lamond, V.L. Martin y S.R. Duncan. 1998. Effects of late-season nitrogen fertilizer on irrigated soybean yield and composition *J. Prod. Agric.* 11(3):331-336.
- Whitney, D.A. 1997. Fertilization. *En: Soybean production handbook*. Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service, C-449.
- Wilson, D.O., F.C. Boswell, K. Ohki, M.B. Parker, L.M. Shuman y M.D. Jellum. 1982. Changes in soybean seed oil and protein as influenced by manganese nutrition. *Crop Sci.* 22:948-952.
- Yamada, T. 1999. Adubação balanceada da soja. *En: INPOFOS Cono Sur, Jornada de Actualización Técnica para profesionales "Fertilización de Soja"*. p. 12-17. [http://www.ppi-ppic.org/ppiweb/ltams.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/ea2e3b170df5efe403256a9900640c96/\\$FILE/SojaYamada.doc](http://www.ppi-ppic.org/ppiweb/ltams.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/ea2e3b170df5efe403256a9900640c96/$FILE/SojaYamada.doc) Acceso Enero 2009.
- Yamada, T. 2005. Simpósio discute relações entre nutrição mineral de plantas e outros fatores abióticos e a incidência de doenças de plantas. *Informações Agronômicas* 109:8-13.
- Yamagishi, N. y Y. Yamamoto. 1994. Effect of boron on nodule development and symbiotic nitrogen fixation in soybean plants. *Soil Sci. and Plant Nutr.* 40(2):256-2741.
- Yin, X. y T.J. Vyn. 2002. Soybean Responses to Potassium Placement and Tillage Alternatives following No-Till. *Agron. J.* 94:1367-1374.
- Zamuner, E., H.E. Echeverría y L.I. Picone. 2004. Fósforo disponible en trigo bajo siembra directa. *Actas CD XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Paraná, Entre Ríos. AACCS.
- Zapata, F., S.K.A. Danso, G. Hardarson y M. Fried. 1987. Time course of nitrogen fixation in field-grown soybean using Nitrogen-15 methodology. *Agron. J.* 79:172-176.

## 6.1. Lectura recomendada

- Alvarez, R., J.H. Lemcoff y A.H. Merzari. 1995. Balance de nitrógeno en un suelo cultivado con soja. *Ciencia del Suelo* 13:38-40.
- Benjamín, J.G. y D.C. Nielsen. 2006. Water deficit effects on root distribution of soybean, field pea and chickpea. *Field Crops Research* 97(2-3):248-253.
- Datnoff, L.E., W.E. Elmer y D.M. Huber (ed.). 2007. *Mineral Nutrients and Plant Disease*. APS Press, St. Paul, MN.
- Derpsch, R. y J. Benites. 2004. *Agricultura Conservacionista no Mundo. XV Reunión Brasileira de Ciencia do Solo*. Universidad de Santa María, RS, Brasil.
- FEBRAPDP - Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha. 2009. <http://www.febrapdp.org.br/port/plantiodireto.html> Acceso Enero 2009.
- Flaskerud, G. 2003. Brazil's Soybean Production and Impact. NSDSU Extension Service EB-79, July 2003. ND University, USA. [www.ag.ndsu.edu/pubs/plantsci/rowcrops/eb79w.htm](http://www.ag.ndsu.edu/pubs/plantsci/rowcrops/eb79w.htm) Accesa el 3 Ago 2009.
- Franzen, D.W. 1999. Soybean soil fertility. North Dakota state university extension service.
- Furlani, A.M.C., P.R. Furlani, R.T. Tanaka, H.A.A. Mascarenhas y M.D.P. Delgado. 2001. Variability in soybean germplasm for phosphorus uptake and use efficiency for dry matter yield. p. 74-75. *En: Horst et al.* (ed.). *Plant nutrition - Food security and sustainability of agro-ecosystems*. 2001. Kluwer Academic Publishers.
- García, F. y L. Picone. 2004. Dinámica y manejo de fósforo en siembra directa. XVI Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Sociedad Latinoamericana de la Ciencia del Suelo. Cartagena de Indias, Colombia. 27 de Septiembre-1 de Octubre de 2004.
- Gerwing, J. y R. Gelderman. 1998. *Fertilizer recommendation guide*. Soil testing laboratory, South Dakota State University.
- INTA. 2010. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Secretaria de Agricultura, Ganadería Pesca y Alimentación de Argentina. [www.inta.gov.ar](http://www.inta.gov.ar) Acceso Abril 2010.
- Jones, J.W. y P.C. Luyten. 1998. Simulation of biological processes. Cap. 2:19-62. *En: Peart, R. y R. Curry* (ed.). *Agricultural System Modeling and Simulation* Marcel Dekker, Inc. New York.
- Jones, J.W., G. Hoogenboom, C.H. Porter, K.J. Boote, W.D. Batchelor, L.A. Hunt, P.W. Wilkens, U. Singh, A.J. Gijssman y J.T. Ritchie. 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* 18:235-265. <http://www.icasa.net/index.html>.
- Kelling, K.A. 2003. Foliar fertilization of soybeans. *Bull New Horizons in Soil Science*. Nº. 5 November. Univ. of Wisconsin, Madison.

- Laüchli, A. y R. Pflüger. 1978. Potassium transport through plant cell membranes and metabolic role of potassium in plants. *In: Potassium Research - Review and Trends*. p. 111-163. IPI Suiza.
- Leggett, J.E. y W.A. Gilbert. 1969. Magnesium uptake by soybeans. *Plant Physiol.* 44:1182-1186.
- Leggett, J.E. y M.H. Frere. 1971. Growth and nutrient uptake by soybean plants in nutrient solutions of graded concentrations. *Plant Physiol.* 1971, 48:457-460.
- Lövenstein, H.M., R. Rabbinge y H. van Keulen, 1992. Biophysical Factors of Agricultural Production. Textbook 2. *En: World Food Production*. Open Universiteit, Heerlen, 1992.
- Minor, H.C., J. Stecker y J.R. Brown. 1993. Phosphorus in Missouri Soils. University extension, University of Missouri-Columbia.
- Penas, E.J. y R.A. Wiese. 1987. Fertilizer suggestions for soybeans. Cooperative Extension, Institute of Agriculture and Natural resources, University of Nebraska-Lincoln, G87-859-A.
- Rosolem, C.A. y A.E. Boaretto. 1989. Adubação foliar. *En: Simpósio Brasileiro De Adubação Foliar, 2., 1987, Botucatu, SP. Anais. Campinas: Fundação Cargill, v. 2. p. 513-545.*
- Ruffo, M. y A.T. Parsons. 2004. Cultivos de Cobertura en Sistemas Agrícolas. *Informaciones Agronomicas del Conosur. No. 21. Marzo 2004.*
- Schnepf, R.D., E. Dohlman y C. Bolling. 2001. Agriculture in Brazil and Argentina: Developments and Prospects for Major Field Crops. Market and Trade Economics Division, Economic Research Service, U.S. Department of Agriculture, Agriculture and Trade Report, WRS-01-03. November 2001.
- Weaver, R.W. y L.R. Frederick. 1974a. Effect of inoculum rate on competitive nodulation of *Glycine max* L. Merrill. I. Greenhouse studies. *Agron. J.* 66:229-232.
- Wagner, J.R. 2008. La utilización de soja en la alimentación humana. Conferencia. <http://www.ms.gba.gov.ar/CalidadAlimentaria/Ciclo1/4conf.htm>.

## Apéndice 1: Fotografías

Foto N° 1. Deficiencia de Nitrógeno en cultivos sin inocular  
(Cortesía de Alejandro Peticari).



Foto N° 2. Deficiencia de Fósforo en cultivos en Santa Fe, Argentina  
(Cortesía IPNI Fernando Garcia).





Foto N° 3. Deficiencia de Potasio en cultivos (Cortesía SCPA).



Foto N° 4. Deficiencia de Azufre en cultivos en Argentina (Cortesía Fernando Garcia).



Foto N° 5. Deficiencia de Magnesio en cultivos (Cortesia SCPA).



Foto N° 6. Deficiencia de Boro (Cortesia Borax Ltd - Patrick Loo).

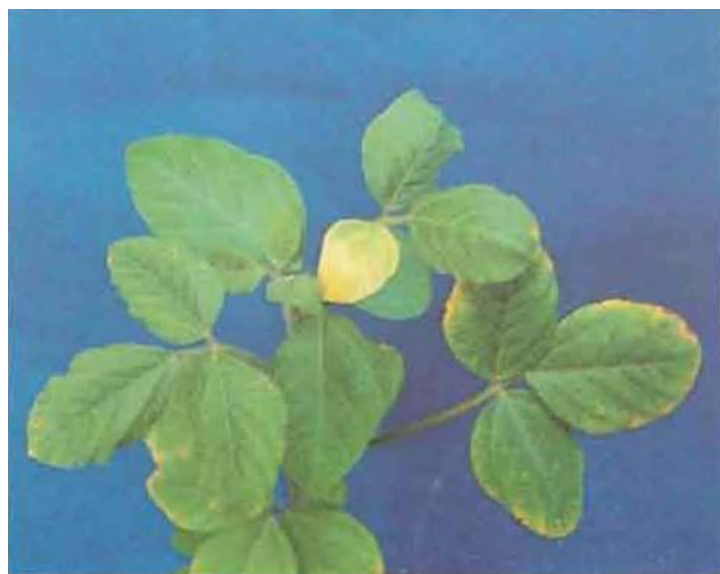


Foto N° 7. Deficiencia de Hierro en cultivos en Entre Ríos, Argentina (Ricardo Melgar).



Foto N° 8. Deficiencia de Manganeso en soja (Cortesia SCPA).



Foto N° 9. Deficiencia de Molibdeno en Brasil (Cortesia SCPA).



Foto N° 10. Deficiencia de Zinc (Cortesia University of Nebraska-Lincoln).

