

MANUAL DE BUENAS PRÁCTICAS DE MANEJO DE FERTILIZACIÓN

Andres Grasso
Martin Díaz-Zorita

MANUAL DE BUENAS PRÁCTICAS DE MANEJO DE FERTILIZACIÓN



FERTILIZAR

ASOCIACION CIVIL



I Manual de buenas prácticas de manejo de fertilización

(2da edición ampliada y actualizada)

Andres Grasso y Martin Díaz-Zorita
(editores)

Ciudad Autónoma de Buenos Aires *Argentina*
Julio 2020



Esta publicación se encuentra disponible en formato digital. Puede descargarse desde este código QR, o ingresando a la web **www.fertilizar.org.ar**.

ISBN 978-987-47016-2-6



Fertilizar Asociación Civil

Manual de buenas prácticas de manejo de fertilización / editado por Andrés Anibal Grasso ; Martín Díaz Zorita. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : Fertilizar Asociación Civil, 2020.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-987-47016-2-6

1. Fertilidad del Suelo. 2. Agricultura Sustentable. 3. Cultivo Agrícola. I. Grasso, Andrés Anibal, ed. II. Díaz Zorita, Martín, ed. III. Título.

CDD 630

Producción



EDICIONES

Fundada hace más de 20 años, FERTILIZAR es una asociación civil sin fines de lucro, formada por diferentes actores de la industria agropecuaria, cuyo objetivo es **promover** la importancia de la **reposición de nutrientes**, el **uso responsable de fertilizantes** y el **cuidado del ambiente** de alta productividad, contribuyendo al logro de una agricultura sustentable.

Con miras a este objetivo, FERTILIZAR Asociación Civil lleva a cabo múltiples actividades como la difusión de información e investigación técnico-científica adaptada a la realidad local. Además, se financian investigaciones científico-técnicas, se desarrollan convenios de vinculación tecnológica, se organizan eventos y reuniones de divulgación, se generan publicaciones de información sobre el tema y se coordinan convenios con diferentes entidades del sector, entre otras.



www.fertilizar.org.ar



[/fertilizar.asociacioncivil](https://twitter.com/fertilizar.asociacioncivil)



[@fertilizarAC](https://www.facebook.com/fertilizarAC)

I Agradecimientos

FERTILIZAR Asociación Civil agradece la participación y colaboración de los siguientes investigadores y entidades en el desarrollo de esta publicación:

Fernando García-Director de IPNI (International Plant Nutrition Institute) Cono Sur

Flavio Gutierrez Boem- Profesor Adjunto Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes de la Facultad de Agronomía (UBA)/Investigador Independiente del CONICET

Miguel Taboada – Director del Instituto De Investigación Suelos del INTA

Comité Técnico de FERTILIZAR Asociación Civil

Empresas asociadas

IFA -International Fertilizer Association

Red BPA- Red de Buenas Prácticas Agropecuarias

*...y a todos aquellos actores de la comunidad agroindustrial que a partir del uso de **Las Buenas Prácticas Agropecuarias**, contribuyen a mejorar nuestro sistema productivo.*

I INDICE

Prólogo	7
Pautas de manejo de fertilizantes	8
Los nutrientes son parte de los sistemas de producción agropecuaria	8
Principales fuentes de nutrientes.....	9
Manejo eficiente y efectivo de nutrientes	13
Las metas de eficiencia y de efectividad son complementarias	14
Ciclos de nutrientes en agricultura y procesos de pérdida (o de salida del sistema)	15
Manejo integrado de nutrición de plantas y fertilidad de suelos	17
Pautas para diseñar buenas prácticas de uso de nutrientes	18
Buenas prácticas de manejo y administración responsable de nutrientes	18
Principios científicos generales de las buenas prácticas de manejo de fertilizantes	19
Elección de la fuente correcta del fertilizante	19
Determinación de la dosis correcta de nutriente	20
El mejor momento para la aplicación de nutrientes	22
Dónde colocar el nutriente	23
Las “B” en el manejo adecuado de productos biológicos para la nutrición vegetal	24
Resumen actualizado de información disponible para la implementación de buenas prácticas para el manejo de la fertilización de cultivos en Argentina	27
Los nutrientes y la sustentabilidad	32
El manejo de nutrientes y la seguridad alimentaria	32
El manejo de nutrientes y la salud del suelo	32
Interacción entre el agua y los nutrientes	34
El manejo de nutrientes y el cambio climático	34
Manejo de nutrientes y el ambiente	36
Manejo de fertilizantes desde el punto de vista de su impacto sobre el ambiente	37
La nutrición de los cultivos en sistemas agroecológicos	39
ANEXOS	43
Muestreo de suelos: Instrucciones y pautas operativas	44
Pautas para el muestreo de tejido vegetal para análisis químico de nutrientes	49
Peso atómico y equivalente de algunos elementos, iones y sales	53
Peso molecular de las formas iónicas absorbidas por las plantas	54
Requerimientos nutricionales	55
Análisis de nutrientes en plantas y rangos de concentraciones de suficiencia	56
Referencias	57

I Prólogo

En esta segunda edición del Manual de Buenas Prácticas de Manejo de Fertilización, que elaboramos desde FERTILIZAR AC. Incorporamos dos nuevos capítulos, con el objetivo de seguir actualizando y enriqueciendo esta herramienta de consulta.

El primero, que está ubicado dentro de “Pautas para diseñar buenas prácticas de uso de nutrientes”, se titula *“Las “B” en el manejo adecuado de productos biológicos para la nutrición vegetal”* y hace referencia a cómo el uso de microorganismos mejora las estrategias de fertilización. En estas páginas destacamos la importancia de la inclusión de productos biológicos en la agricultura, ya que aumenta la eficiencia del uso de los nutrientes, tanto los disponibles en el suelo como los adicionados a través de los fertilizantes tradicionales. Esta sinergia se debe a que los microorganismos –contenidos en los inoculantes– aportan sustancias y mecanismos que permiten disponibilizar nutrientes que de otra forma no eran accesibles para los cultivos.

El segundo capítulo que se agrega es parte de “Los nutrientes y la sustentabilidad” y su nombre es *“La nutrición de los cultivos en sistemas agroecológicos”*.

En los sistemas agroecológicos a gran escala se busca maximizar el beneficio de los servicios ecosistémicos ligados a las interacciones ecológicas entre las plantas, los animales y el suelo, accionando diferentes estrategias agronómicas. Los planteos productivos no son generalizables y se deben diseñar estrategias de manejo propias para cada sitio, tal que cada cultivo cumpla con un objetivo económico y además se convierta en un antecesor exitoso para cultivos siguientes.

En FERTILIZAR AC, buscamos generar distintas acciones de difusión y extensión, que permitan la generación de contenidos de utilidad para hacer más eficientes los planteos productivos. Considerando, a su vez, a la fertilización de cultivos como una tecnología indispensable para alcanzar tal fin. Siempre, con un horizonte claro, el del logro de una producción rentable y sustentable, a través de la promoción de una adecuada reposición de nutrientes y la preservación del recurso suelo.

En nombre de FERTILIZAR AC agradecemos a quienes colaboraron en el armado de estos nuevos contenidos, para seguir complementado la información que incluimos en este Documento, que constituye una herramienta clave para el manejo responsable de fertilizantes y para la implementación de las mejores estrategias de fertilización, apuntando a altos rendimientos.

Maria Fernanda Gonzalez Sanjuan
Gerente Ejecutivo Fertilizar AC

Jorge Bassi
Presidente Fertilizar AC

I Pautas de manejo de fertilizantes

Los nutrientes son parte de los sistemas de producción agropecuaria

Adaptado de International Fertilizer Association (2016)

Aplicar nutrientes en forma balanceada y precisa es un requerimiento para el desarrollo sustentable de la agricultura que produce alimentos con el propósito de alcanzar la seguridad alimentaria. La nutrición específica del suelo y de los cultivos incrementa la productividad agrícola asegurando una máxima captación de nutrientes por las plantas y por lo tanto reduciendo las pérdidas de nutrientes al ambiente, entre los que se incluyen emisiones de óxido nitroso y de otros gases de efecto invernadero.

Las plantas, para su crecimiento saludable y productivo, requieren diecisiete elementos esenciales: carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), azufre (S), magnesio (Mg), calcio (Ca), hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), cobre (Cu), boro (B), molibdeno (Mo), cloro (Cl) y níquel (Ni). Además, otros elementos tales como sodio (Na), cobalto (Co) y silicio (Si), también son esenciales para el crecimiento de algunas especies.

Carbono, H y O son obtenidos desde la atmósfera y el agua. El resto de los elementos, según sus concentraciones medias en las plantas, pueden dividirse en tres grupos: macronutrientes primarios (N, P y K), macronutrientes secundarios (S, Mg y Ca) y micronutrientes (Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, Cl y Ni).

Si la disponibilidad de un elemento esencial para la nutrición de las plantas se encuentra en cantidad insuficiente, el crecimiento de estas plantas es limitado y así lo son tanto los rendimientos como la calidad de los productos cosechados. El crecimiento de las plantas es limitado por el elemento esencial que se encuentra en menor cantidad por debajo del nivel óptimo de disponibilidad (ley del mínimo Liebig, Fig.1). Nitrógeno y P son los elementos de deficiencia generalizada en Argentina. Azufre, Zn y B están incrementando su deficiencia tanto en suelos como en plantas convirtiéndose en elementos deficitarios en gran parte del área de producción agrícola en la Argentina.



Figura 1: Ilustración de la ley del mínimo de Liebig del mínimo que postula que el rendimiento alcanzable es determinado por el factor más limitante en el lote.

Principales fuentes de nutrientes

Adaptado de International Fertilizer Association (2016)

Los nutrientes pueden provenir de varias fuentes tales como:

- La **meteorización de rocas** es un proceso lento de liberación de pequeñas cantidades de nutrientes, insuficiente para sostener rendimientos medios o altos en el tiempo.
- **Aplicaciones anteriores** de nutrientes que no han sido captados por los cultivos previos que pueden tanto perderse al ambiente o ser almacenados en los suelos y quedar potencialmente disponibles para cultivos siguientes. Algunos elementos como N y S pueden presentar importantes pérdidas en el año de aplicación, principalmente en condiciones de alta humedad. Nutrientes como P y K permanecen en los suelos por periodos prolongados, generalmente años, dependiendo del tipo de suelo, frecuencia e intensidad de lluvias y prácticas de manejo.
- La **deposición atmosférica**, principalmente de N y de S, puede ser un aporte significativo en algunas áreas. En respuesta a regulaciones de reducción de las emisiones de S para prevenir lluvias ácidas, los aportes de este elemento han disminuido y el S ha incrementado su limitación para la normal producción de las plantas.
- **Aportes desde el agua de riego** conteniendo algunos nutrientes esenciales para los cultivos.
- Los **residuos de cultivos**, tales como hojas, tallos y raíces cuando quedan sobre o en el suelo liberan los nutrientes que contienen (Tabla 1). Estos residuos son mayormente ricos en K. Sin embargo, al quemarse o utilizarse como alimentos sus aportes disminuyen. Los residuos de los cultivos varían ampliamente en los contenidos y las cantidades de nutrientes disponibles para las plantas que son liberados durante un tiempo pueden ser estimados principalmente a partir de información local.
- El **estiércol animal** es una fuente valiosa de nutrientes cuya composición varía ampliamente según fuentes (Tabla 1) y prácticas de manejo. Cuando la calidad de la alimentación es pobre, el estiércol contiene pocos nutrientes.

Tabla 1. Concentración (g/kg) general de nutrientes de residuos de cultivos y de estiércol de bovinos y de aves (Adaptado de Barker et al. 2000).

Nutriente	Residuos de cultivos	Estiércol de aves	Estiércol de bovinos
N	10-15	25-30	20-30
P	1-2	20-25	4-10
K	10-15	11-20	15-20
Ca	2-5	40-45	5-20
Mg	1-3	6-8	3-4
S	1-2	5-15	4-50

- Los **residuos orgánicos descompuestos** (compostaje) pueden ser agregados a los suelos para aportar nutrientes y contribuir a su acondicionamiento. La calidad de los compostajes puede variar según los materiales y procesos utilizados (Tabla 1).
- Los **residuos biológicos urbanos** (biosólidos) provenientes de aguas de tratamiento domiciliario puede ser reciclados y aportar importantes nutrientes para las plantas. Las cantidades de nutrientes en los biosólidos, dependiendo de sus orígenes, procesos de tratamiento, almacenamiento y distribución, varían en cantidad y formas. Es conveniente el análisis regular de sus contenidos en nutrientes y de posibles contaminantes.
- La **fijación biológica de N** (FBN) es la conversión del N atmosférico inerte (N₂) en formas de N que las plantas pueden utilizar. La FBN se encuentra en numerosas combinaciones de cultivos y bacterias. Es mayor en sistemas simbióticos desarrollados entre leguminosas (ej. soja, arveja, poroto, alfalfa, maní, etc.) y rizobios. Los aportes anuales por FBN reportados varían entre 20 y 400 kg de N/ha dependiendo de las especies de plantas, duración de la estación de crecimiento y condiciones climáticas.
- **Fertilizantes** elaborados por la industria de fertilizantes y se emplean para la producción agropecuaria aportando uno o más elementos esenciales disponibles para las plantas. Los fertilizantes que contienen solamente un nutriente son denominados fertilizantes “simples” (Tabla 2), mientras que los fertilizantes con aportes de múltiples nutrientes pueden ser tanto complejos (todos los nutrientes en mismo granulo o solución) o mezclas físicas (mezcla de distintos productos). Cada producto fertilizante tiene sus propios beneficios y desventajas que dependen de condiciones agroecológicas y económicas locales o específicas.

Tabla 2. Contenido medio de nutrientes como porcentaje del producto de algunos fertilizantes

Nombre común	N	P2O5	K2O	S	Estado físico
Amonio	82	0	0	0	Gaseoso
Urea	45 - 46	0	0	0	Solido
Sulfato de amonio	21	0	0	24	Solido
Nitrato de amonio	33 - 34,5	0	0	0	Solido
Nitrato cálcico de amonio	20,4 - 27	0	0	0	Solido
UAN (Urea nitrato de amonio)	28 - 32	0	0	0	Liquido
Fosfato monoamónico	11	52	0	0	Solido
Fosfato diamónico	18	45	0	0	Solido
Nitrato de potasio	13	0	44	0	Solido
Roca fosfórica molida	0	20 - 40	0	0	Solido
Superfosfato simple	0	16 - 20	0	12	Solido
Superfosfato triple	0	46	0	0	Solido
Cloruro de potasio	0	0	60	0	Solido
Sulfato de potasio	0	0	50	18	Solido

Es importante remarcar que los cultivos responden a los nutrientes aportados independientemente de su forma de aporte pero que solo pueden captar los nutrientes en sus formas inorgánicas. Las fuentes orgánicas de nutrientes tienen que ser mineralizadas

(convertidas desde formas orgánicas a inorgánicas) antes de ser captadas por las plantas. La cantidad de nutrientes aportados según diferentes fuentes varía ampliamente entre y dentro de los agroecosistemas. La nutrición sustentable de cultivos identifica y utiliza todas las fuentes de nutrientes para las plantas.

Los nutrientes son exportados desde los sitios (lotes) de producción cuando los cultivos son cosechados. La cantidad de nutrientes removidos al cosechar es específica de cada cultivo y parte de la planta y proporcional a su rendimiento. Para mantener la fertilidad de los suelos y lograr rendimientos y calidad sustentable de los cultivos, los nutrientes exportados desde los lotes con la cosecha y perdidos al ambiente, fuera del sitio productivo, deben ser reemplazados o repuestos por fuentes orgánicas y/o minerales.

En suelos donde la fertilidad es subóptima y donde esta práctica es económicamente viable puede ser de utilidad aplicar altas dosis de nutrientes en combinación con otras prácticas necesarias de manejo de la fertilidad de suelos para reducir factores de limitación relacionados a la nutrición, incrementar la disponibilidad de nutrientes para los cultivos y mejorar la salud de los suelos.

Los nutrientes aportados desde fuentes tales como el aporte natural del suelo, la deposición atmosférica, el reciclado de residuos, etc. puede ser insuficientes para alcanzar rendimientos medios a altos en el tiempo. Para mantener altos rendimientos generalmente se requiere el aporte adicional de nutrientes en formas de fertilizantes o fuentes orgánicas procesadas. Los fertilizantes pueden ser manejados con el objetivo de mejorar el valor nutricional de los cultivos y así mejorar la salud animal y humana. Por ejemplo, la fertilización con N y S influye sobre los contenidos y calidad de proteínas, la fertilización con K puede incrementar la concentración de antioxidantes y la fertilización con Zn puede incrementar la concentración de este nutriente en los granos y así su calidad nutricional.

Los fertilizantes son sustancias orgánicas o inorgánicas que aportan uno o más nutrientes, elementos necesarios para el desarrollo normal de las plantas. La aplicación de fertilizantes, tanto en formas químicas como biológicas (i.e. inoculantes microbianos) o provenientes de residuos animales o vegetales (ej. estiércoles, camas de pollos, etc.), mejora la fertilidad de los suelos y la productividad de las plantas. Esta práctica muestra una demanda constante y creciente tanto en los sistemas agropecuarios modernos como en espacios verdes urbanos y de recreación. Dado que la eficiencia de aprovechamiento de los nutrientes aplicados no es completa, los excedentes no captados por las plantas pueden conducir a potenciales riesgos de degradación del ambiente principalmente al acumularse en sistemas acuáticos tanto superficiales como subterráneos. Entre otros procesos de degradación se encuentran la acumulación de formas químicas tóxicas (ej. Nitratos en aguas para consumo humano o animal) y el enriquecimiento anormal de nutrientes que conduce a excesos en la producción de materia orgánica con alta demanda de oxígeno para su descomposición (i.e. eutrofización).

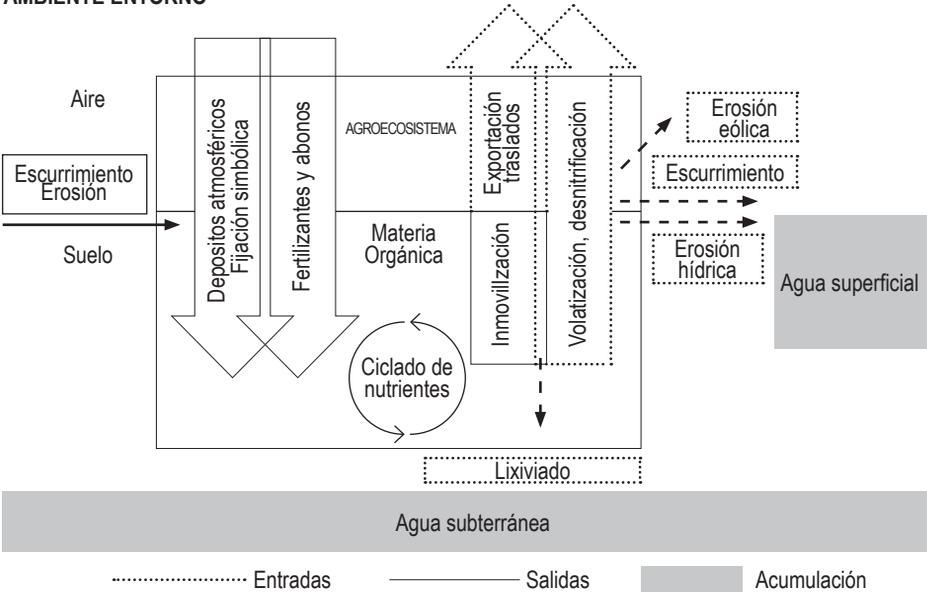
Los problemas ambientales de los nutrientes en sistemas agropecuarios se atribuyen en forma combinada no solo al manejo inadecuado de insumos sino también a aspectos inherentes a la geoquímica del elemento y el medio considerado. En general, se describen

como los principales problemas ambientales derivados del uso de fertilizantes a los vinculados con el N dado que su ciclo biogeoquímico es abierto donde las actividades agrícolas y ganaderas intensifican las entradas y salidas del nutriente de los agroecosistemas. Los riesgos de acumulación de P, dadas las características geoquímicas del elemento, junto con su manejo en sistemas agrícolas, son de menor frecuencia y más acotados.

En los ecosistemas naturales, considerados biogeoquímicamente cerrados, los nutrientes se reciclan o tienen mínimos intercambios con el exterior (i.e. ingresos por lluvias, deposición de polvo atmosférico, etc., en equilibrio aparente con pérdidas por volatilización, desnitrificación, lixiviación, erosión, etc.). Sin embargo, los ecosistemas agropecuarios son abiertos por lo que presentan un intenso intercambio con su entorno mostrando pérdidas (i.e. extracciones, traslados, erosión, escurrimiento, etc.) que generalmente superan a los mecanismos naturales de ingreso (Fig. 2). Los altos rendimientos alcanzados por los genotipos mejorados cultivados en los agroecosistemas actuales hacen que la mayoría de los suelos no tengan capacidad de aportar los nutrientes por procesos naturales, tanto en cantidad como en oportunidad. Para alcanzar altos rendimientos se requiere del aporte externo de nutrientes empleando variados tipos de fertilizantes. En planteos agropecuarios, el uso de fertilizantes es una parte esencial e imprescindible entre sus actividades de producción.

Figura 2: Esquema simplificado de transformaciones de nutrientes en agroecosistemas y su entorno. Adaptado de Díaz-Zorita y Fernández Canigia (2016) en “El aporte de la microbiología para mejorar el uso de fertilizantes y reducir sus efectos ambientales”.

AMBIENTE ENTORNO



La necesidad de mejorar la oferta natural de nutrientes, su disponibilidad, y la proporción captada por los cultivos son desafíos corrientes en el desarrollo de modelos productivos sustentables. En este contexto se conjugan tanto herramientas de manejo del suelo como de los cultivos y el uso de fuentes externas de nutrientes (fertilizantes y abonos). Es así como cuando disminuye la eficiencia de captación o de retención de los nutrientes por las plantas se incrementa el riesgo de acumulación de estos elementos fuera de su alcance y se generan, en algunas condiciones ambientales, sitios de potencial riesgo de contaminación. Es reconocida la participación de microorganismos en procesos naturales de ciclado de nutrientes (i.e. mineralización, descomposición, etc.) y de crecimiento de las plantas (i.e. fijación simbiótica de nitrógeno, producción de sustancias estimulantes, protección contra enfermedades, secuestro de compuestos dañinos, etc.). Por lo tanto, la implementación de prácticas de manejo promoviendo su presencia y actividad contribuye a mejorar la nutrición de los cultivos y la eficiencia en su aprovechamiento reduciendo potenciales riesgos ambientales.

Manejo eficiente y efectivo de nutrientes

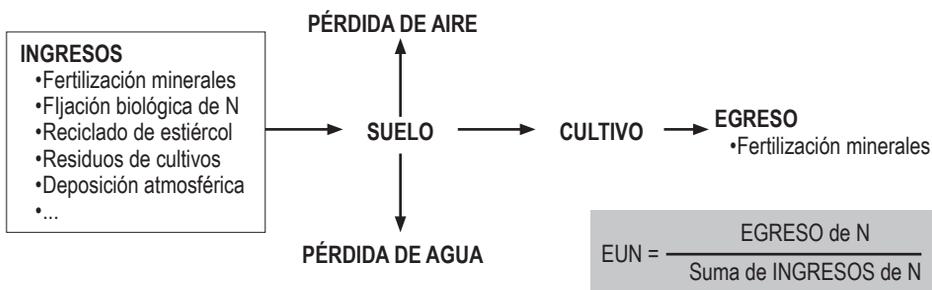
Adaptado de International Fertilizer Association (2016)

¿Qué es el uso eficiente de nutrientes?

Desde la perspectiva de un productor, el uso eficiente de nutrientes es definido como la proporción del nutriente aplicado (independientemente de la fuente) que es captada por un cultivo (i.e. ¿cómo lograr lo mejor al agregar un nutriente?).

Desde la visión del monitoreo del sistema productivo, la eficiencia es calculada desde la relación entre la extracción y la aplicación (i.e. ¿cuál es la proporción del nutriente aplicado que finaliza en el producto cosechado?).

Figura 3: Esquema de cálculo de la eficiencia de uso del nitrógeno (EUN).



Bajas relaciones entre egreso e ingreso (por ej. inferiores a 50%) a menudo reflejan riesgos de pérdidas de nutrientes al medioambiente mientras que proporciones mayores (Por ej. superiores a 90%) pueden reflejar prácticas extractivas que reducen la fertilidad de los suelos si son practicadas durante varios años. Ambos casos no son sustentables. La “zona verde” se define dónde la productividad del cultivo es alta y donde la relación entre la extracción y la aplicación es próxima al óptimo. Esta región es específica de cada sistema de cultivo y nutriente (Fig.4).

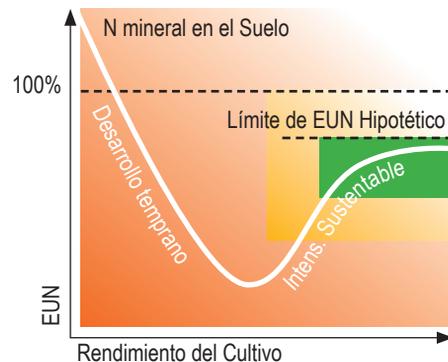
El uso eficiente de los nutrientes está altamente influido por la forma en la que los fertilizantes minerales, y otras fuentes de nutrientes, los cultivos y los suelos son manejados. La eficiencia de uso

de nutrientes en países desarrollados se ha incrementado durante aproximadamente las últimas tres décadas cuando los productores han accedido a tecnologías modernas e información. Esto ilustra el movimiento hacia la intensificación sustentable donde los productores incrementan la productividad agrícola mientras conservan los recursos básicos y reducen los riesgos de impactos al medioambiente asociados con excesos de nutrientes por unidad extraída. Por el contrario, en la mayoría de los países en desarrollo, la situación es aún de deterioro. En estos casos, el acceso y la adopción de prácticas mejoradas de manejo tales como el monitoreo de nutrientes y la implementación de soluciones integradas son necesarias para revertir esta situación.

Dado que hay interacciones entre nutrientes, el mejoramiento en la eficiencia de uso de un nutriente puede lograrse por un mejor manejo del nutriente, como también por el mejor manejo de otros nutrientes con los que interactúa a través de la nutrición balanceada de cultivos. Por ejemplo, el S es conocido por mejorar la síntesis de proteínas y por lo tanto la eficiencia en el uso del N.

Las metas de eficiencia y de efectividad son complementarias

Figura 4: Evolución relativa al rendimiento de cultivos de la eficiencia de uso del nitrógeno. Los sistemas de cultivo se mueven progresivamente de una zona roja a la zona naranja y finalmente a la zona verde que refleja altos rendimientos y óptima eficiencia de uso del nitrógeno (Adaptado de Zhang et al. 2015).



Adaptado de International Fertilizer Association (2016)

Mientras el incremento en la eficiencia de uso de nutrientes es un propósito importante, este no debería ser en detrimento del resultado de otras áreas de importancia tales como los rendimientos del cultivo, la fertilidad de los suelos, la productividad del agua, etc. que

reflejan la efectividad del sistema productivo agrícola. La eficiencia de uso de nutrientes medida como la relación entre egresos e ingresos es típicamente mayor en muy bajas dosis de aplicación de nutrientes que conducen a bajos rendimientos. Por ejemplo, es posible incrementar la eficiencia de uso de nutrientes consumiendo las reservas del nutriente en los suelos, pero es una opción no sustentable porque esta práctica impactará en la fertilidad del suelo en el mediano y largo plazo limitando su productividad. En forma similar, es posible alcanzar alta eficiencia de uso de nutrientes reduciendo las dosis aplicadas de fertilizantes, pero puede ser en detrimento de los rendimientos de los cultivos. Mientras que el seguimiento de la eficiencia de uso de nutrientes aporta información de utilidad, esta podría ser parte de un conjunto de indicadores complementarios.

Las recomendaciones a los productores de buenas prácticas para condiciones específicas por sitio y por cultivo son opciones para mejorar el resultado general y la sustentabilidad del sistema productivo teniendo en cuenta metas económicas, sociales y ambientales convalidadas por la sociedad.

Ciclos de nutrientes en agricultura y procesos de pérdida

Adaptado de International Fertilizer Association (2016)

Las principales formas del N en el suelo son compuestos orgánicos con N y N mineral en forma de amonio y de nitrato. El N mineral es una pequeña fracción del total del N en el suelo. La mayor parte del N en un suelo superficial se presenta como N orgánico. Estas diferentes fracciones de N presentan varios procesos de transformación que pueden resultar también en variadas pérdidas al aire y al agua (Fig. 5). Los principales procesos de pérdida de nitrógeno en los sistemas agrícolas son:

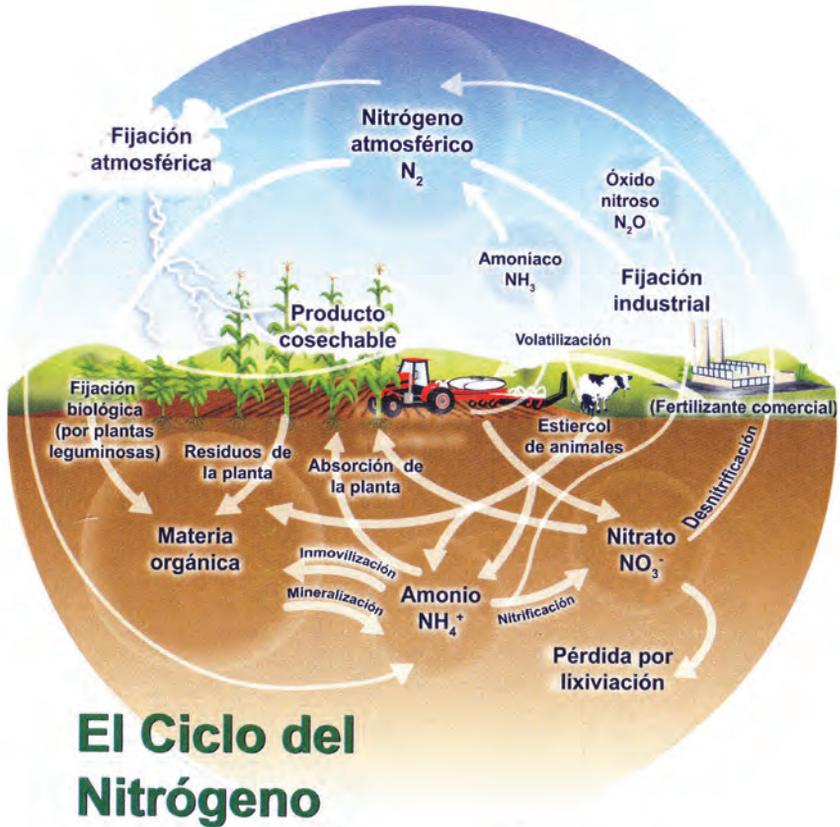
- Erosión de suelos y escurrimiento de partículas.
- Lixiviado de nitratos (NO_3) al agua freática,
- Volatilización de amoníaco (NH_3) a la atmósfera,
- Producción de óxido nitroso (N_2O) y de óxido nítrico (NO) por nitrificación,
- Producción de óxido nitroso (N_2O) y de di nitrógeno (N_2) por desnitrificación

En el caso del P, las principales pérdidas ocurren a través de la erosión del suelo y el escurrimiento de partículas. Las pérdidas por lavado (lixiviado) de P son relativamente pequeñas en comparación con las de N dado por la poca movilidad del P en los suelos.

El K es también perdido por erosión, escurrimiento y lavado. Las pérdidas por lixiviado son proporcionalmente mayores para K comparadas con las de P dada la mayor movilidad del K en los suelos.

El ciclo del S es más complejo con pérdidas, tal como en el caso del N, tanto al suelo como al agua.

Figura 5: Esquema del ciclo del nitrógeno. (IPNI, 2012)



El Ciclo del Nitrógeno

Dado que los ciclos de nutrientes en agricultura no son perfectos, la agricultura sustentable se basa en aportes externos de nutrientes, a través del agregado de formas orgánicas (si están disponibles), fertilizantes minerales y fijación biológica de N para completar la brecha causada por la exportación de nutrientes en los productos cosechados y las pérdidas en diferentes estadios en los ciclos de estos. El desafío constante para los agricultores es aplicar la fuente adecuada de cada nutriente en la dosis, momento y ubicación correcta para sostener óptimos rendimientos y al mismo momento minimizar los impactos sobre el medioambiente. Tanto la falta como el exceso de nutrientes pueden resultar en efectos adversos sobre la salud humana, el medioambiente y los ingresos de los productores agropecuarios.

Manejo integrado de nutrición de plantas y fertilidad de suelos

Adaptado de International Fertilizer Association (2016)

Las fuentes minerales y orgánicas de nutrientes son complementarias

Los fertilizantes minerales tienen una mayor concentración de nutrientes que las fuentes orgánicas. Además, su composición de nutrientes está bien definida y a menudo los nutrientes son rápidamente disponibles para los cultivos. Las fuentes orgánicas de nutrientes son, por definición, ricos en materia orgánica, la que contribuye a mejorar propiedades de los suelos tales como su estructura y la infiltración y capacidad de almacenaje de agua. En vistas de estos beneficios, las fuentes minerales y orgánicas de nutrientes son complementarias. Las buenas prácticas de manejo se benefician de esta sinergia.

Beneficios de los manejos integrados de nutrición de plantas y de fertilidad de suelos

Desde el punto de vista de un nutriente, el manejo integrado puede considerarse en dos niveles que comparten objetivos similares que facilitan la captación eficiente de nutrientes y el crecimiento de las plantas con mínimos impactos adversos sobre el medioambiente.

- **Manejo integrado de nutrición de plantas** con el propósito de combinar fuentes orgánicas y minerales de nutrientes a partir de los beneficios particulares de ambos. En sistemas bajo manejo integrado de nutrición de plantas los agricultores aplican fuentes orgánicas disponibles en su campo o de sus vecinos complementados con fertilizantes de manufactura para alcanzar las metas de rendimientos y calidad en los cultivos, y recuperar la fertilidad de los suelos donde los resultados de los análisis de suelos muestran niveles disponibles bajos. Este manejo de nutrición de plantas es una estrategia enfocada sólo en aspectos de aporte de nutrientes para la producción de los cultivos.
- **Manejo integrado de la fertilidad de suelos** con el fin de balancear todas las dimensiones de la captación de nutrientes por las plantas, incluyendo la selección de los genotipos y la consideración de dimensiones biológicas y físicas de la salud de los suelos que pueden incrementar la captación de nutrientes. Por ejemplo, bajo condiciones de estrés por sequía, un suelo cubierto con materia orgánica puede acumular más humedad que un suelo que no tiene la cobertura (“mulch”) y esta humedad adicional puede resultar en incrementos de la captación de nutrientes aplicados con los fertilizantes y mejorar los rendimientos resultando en mayor eficiencia de uso del agua del sistema.

I Pautas para diseñar buenas prácticas de uso de nutrientes

Buenas prácticas de manejo y administración responsable de nutrientes

Adaptado de International Fertilizer Association (2016)

Las denominadas buenas prácticas de manejo de fertilizantes (o nutrientes), BPM, han sido reconocidas por la investigación y la experiencia por ser más productivas, más rentables, más amigables con el medio ambiente y más socialmente aceptadas. El propósito de las BPM es equiparar el aporte de nutrientes con los requerimientos de los cultivos para optimizar los rendimientos mientras se minimizan las pérdidas de nutrientes al ambiente.

La aplicación de las BPM en las cuatro áreas que hacen a la fertilización de cultivos (elección de fuente, dosis de aplicación, momento de aplicación y lugar de aplicación del nutriente) es la base para un manejo efectivo de nutrientes, práctica que permite a los productores lograr eficiencia y efectividad en la nutrición de las plantas y asegurar sus beneficios económicos, sociales y ambientales.

Los cuatro principios de la administración responsable de nutrientes



La no implementación de las BPM en las cuatro áreas solo permite mejorar la performance de la fertilización de manera ineficiente e imparcial. El manejo de los nutrientes debe considerar la implementación de una serie de BPM complementarias entre las cuatro áreas de manejo. Si una de las cuatro no es tenida en cuenta, es poco probable que el manejo de los nutrientes sea eficiente.

La selección de las BPM varía de acuerdo al sitio y estas tendrán el mejor funcionamiento

para un determinado establecimiento cuando se conocen las características locales del suelo y meteorológicas, el tipo de cultivo, el sistema de labranza y otro tipo de información específica para el sitio.

Principios científicos generales de las buenas prácticas de manejo de fertilizantes

Conocer los mecanismos agronómicos involucrados.

- Tener en cuenta los últimos avances científico-técnicos en disciplinas como fertilidad del suelo, nutrición de plantas, física y química del suelo, hidrología y agro meteorología.

Reconocer las interacciones con otros factores del sistema de producción.

- Por ejemplo, densidad y fecha de siembra, cultivar, rotación de cultivos, etc.

Reconocer las interacciones entre la fuente, dosis, momento y localización.

- Por ejemplo, una fuente de liberación controlada probablemente no será aplicada en el mismo momento ni en la misma dosis que una fuente soluble.

Entender los efectos no deseados sobre las raíces, hojas y semillas.

- Por ejemplo, los fertilizantes aplicados en bandas tienen que ser aplicados considerando una distancia de seguridad mínima de forma de prevenir daños en las semillas.

Entender los beneficios de los fertilizantes sobre la calidad de los cultivos tanto como sobre los rendimientos.

- Por ejemplo, los beneficios de la fertilización nitrogenada sobre los contenidos de proteínas y rendimientos en trigo. Las proteínas son un componente muy importante para definir la calidad panadera de la harina producida con el grano. Sin embargo, un exceso en las dosis puede generar un deterioro en los rendimientos, la calidad y en la sustentabilidad. En otros cultivos, los excesos de fertilización nitrogenada pueden favorecer el desarrollo vegetativo en detrimento de la calidad de los órganos cosechables. Por lo tanto, es necesario tomar las mejores decisiones de fertilización para cada tipo de cultivo.

Elección de la fuente correcta del fertilizante

Seleccionar fuentes de nutrientes que provean un abastecimiento balanceado de todos los nutrientes esenciales, sincronizando la liberación con la demanda del cultivo. La fuente de fertilizante más adecuada debe asegurar los nutrientes esenciales limitan los rendimientos de forma disponible para los cultivos. La elección de la fuente debe tener en cuenta las potenciales pérdidas de nutrientes, los riesgos de fitotoxicidad y otros tipos de riesgos asociados al tipo de fuente. La fuente correcta debe ser acorde al cultivo, al ambiente meteorológico, al tipo de suelo y debe estar disponible técnica y económicamente.

Principios científicos para la elección de la fuente de nutrientes

Aplicación de nutrientes de formas disponibles para las plantas.

- Los nutrientes aplicados son solubles en agua y disponibles para ser utilizados por las plantas o, en algunos casos se aplican en formas que no están disponibles pero una vez en el suelo son rápidamente convertidos a formas disponibles.

Ajustar a las propiedades físicas y químicas del perfil de suelo.

- Existen algunas fuentes de fertilizantes que acidifican fuertemente el suelo. Deben ser aplicados en suelos alcalinos o en combinación con sulfato de calcio. No aplicar nitratos en suelos anegados, o la aplicación de urea en superficie en suelos con pH elevado.

Reconocer las interacciones entre los nutrientes y las fuentes.

- Algunos ejemplos pueden ser la interacción P-Zn, el aumento en la disponibilidad del P con el agregado de N y la complementación de los fertilizantes minerales con los abonos.

Conocer las compatibilidades de las mezclas.

- Algunas mezclas de fertilizantes pueden ser fuertemente higroscópicas dificultando luego su aplicación y colocación en el campo. La granulometría de los fertilizantes debe ser homogénea para prevenir la segregación de la mezcla resultante. Ciertas formulaciones líquidas precipitan a bajas temperaturas o reaccionan con otros componentes formando geles. Estas características deben ser reconocidas con el objetivo de prever deficiencias en la fertilización.

Reconocer los beneficios y los perjuicios asociados a los diferentes elementos.

- Todos los nutrientes vienen acompañados de otras moléculas en los diferentes fertilizantes. Estos acompañantes pueden ser beneficiosos, neutrales o perjudiciales para determinados cultivos. Un buen ejemplo puede ser el Cloro que acompaña al potasio en el cloruro de potasio. En maíz es beneficioso mientras que en el tabaco y frutos puede tener impacto negativo sobre la calidad de los productos cosechables.

Manejar los efectos de los elementos no nutritivos.

- Algunas materias primas utilizadas para la producción de fertilizantes contienen elementos traza no nutritivos. El agregado de estos elementos debe mantenerse dentro de los límites de seguridad.

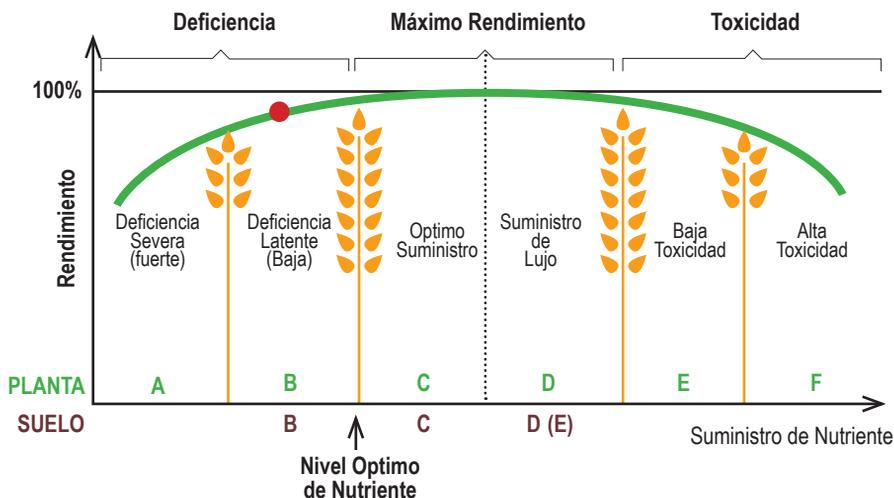
Determinación de la dosis correcta de nutriente

Dosificar de manera correcta los nutrientes esenciales que limitan el desarrollo de los cultivos es fundamental para lograr productividad y calidad. El objetivo de la dosificación es suministrar los nutrientes de manera disponible en el momento en que los cultivos lo requieren. Principalmente es necesario conocer las demandas de nutrientes de los cultivos en los diferentes estadios de desarrollo. La dosis de aplicación debe ser balanceada y

acorde a la demanda de los cultivos de manera de evitar ineficiencias (excesos y déficit, Fig.6). Dosis bajas limitan los rendimientos y la calidad mientras que las dosis en exceso pueden dañar los cultivos y generar externalidades sobre el ambiente. Tanto las dosis en exceso como las deficitarias tienen impactos económicos negativos.

Aumento del C orgánico (%)

Figura 6: Efecto del aporte de un nutriente sobre los rendimientos de un cultivo mostrando efectos de deficiencia potencial y de toxicidad al no aplicar las dosis adecuadas de nutrientes. El punto rojo indica el nivel crítico, por ejemplo, del 90% del aporte óptimo.



Principios científicos para determinar las dosis de nutriente

Determinar la disponibilidad de nutrientes en el suelo.

- La herramienta más utilizada es el análisis de suelo. Puede considerarse los análisis de tejido foliar, ensayos de respuesta, parcelas testigos, etc.

Considerar todas las fuentes de nutrientes disponibles.

- Estas deben incluir la cantidad de nutrientes disponibles en rastrojos, abonos, fertirriego, fertilizantes químicos, etc.

Determinar las demandas de los cultivos.

- La cantidad de nutrientes que requiere un cultivo depende del rendimiento y de la concentración de nutrientes de los productos cosechables. Es importante la precisión para estimar los rendimientos alcanzables y el diseño de la nutrición que asegure las metas de rendimiento propuestas.

Estimar la eficiencia de uso del fertilizante.

- Existen pérdidas de nutrientes que son inevitables, estas deben ser tenidas en cuenta para satisfacer adecuadamente las demandas de los cultivos.

Determinar la demanda de nutrientes campaña a campaña.

- Las demandas de nutrientes y los rendimientos potenciales varían campaña a campaña como consecuencias de la heterogeneidad meteorológica y factores de manejo de cultivo que dan lugar a un ajuste en tiempo real con dosis variables de fertilizantes.

Estimar el balance de nutrientes.

- Si las salidas de nutrientes en los productos cosechados exceden los ingresos por fertilización, la fertilidad del suelo se deteriorará en el largo plazo.

Atender los aspectos económicos del sistema productivo.

- Para los nutrientes que tiene mucha movilidad en el suelo, la dosis óptima económica es donde la última unidad de nutriente agregada es igualada en valor por el incremento generado en el rendimiento del cultivo (ley de los rendimientos decrecientes). Para los nutrientes que son retenidos en el suelo, las cantidades residuales deben ser consideradas para futuros cultivos.

El mejor momento para la aplicación de nutrientes

El momento de la aplicación de nutrientes debe considerar las interacciones entre el momento en que los nutrientes son demandados, la oferta del suelo, los riesgos de ineficiencias y la logística asociada al suministro del fertilizante.

Los cultivos demandan diferentes cantidades y tipos de nutrientes a lo largo de todo el ciclo de desarrollo. El criterio general para alcanzar el óptimo productivo debe ser abastecer con nutrientes disponibles y al alcance de las plantas en el momento en que son demandados. Por lo tanto, si el nutriente está disponible por largos periodos en el suelo aumenta el riesgo de ser removido de la zona radicular o puede ser transformado en formas no disponibles para las plantas. La aplicación en el momento justo resulta clave para sostener los niveles de rendimiento, aumentar la calidad y disminuir las pérdidas de nutrientes.

Principios científicos para decidir el mejor momento de la fertilización

Conocer el momento en que los cultivos demandan los nutrientes.

- La aplicación de los nutrientes debe coincidir con la demanda del cultivo, que a su vez depende de factores tales como fecha de siembra, características del crecimiento y desarrollo del cultivo, sensibilidad a déficits en estados específicos durante la estación de crecimiento, etc.

Conocer la disponibilidad y suministro de nutrientes del suelo.

- Muchos nutrientes pueden estar disponibles a partir de la mineralización de la materia orgánica del suelo. Sin embargo, si las plantas los demandan antes de la mineraliza-

ción, las deficiencias limitarían la productividad.

Conocer la disponibilidad y la liberación de los nutrientes aportados con los fertilizantes.

- La disponibilidad de los nutrientes contenidos en los fertilizantes depende de las condiciones de humedad en suelo al momento de la colocación del fertilizante. El resultado de una desincronización con la demanda del cultivo resulta en pérdidas de nutriente que luego se manifiesta como pérdidas de rendimientos.

Reconocer los efectos de las precipitaciones sobre las pérdidas de nutrientes.

- Es importante conocer en qué momento suceden los eventos de excesos de precipitaciones debido a que ciertos nutrientes son susceptibles de ser lixiviados y no estar disponibles para las plantas. Por ejemplo, en regiones templadas, las pérdidas de N tienden a ser mayores en primavera que en invierno debido al régimen de lluvias.

Evaluar la logística de las labores a campo.

- Aplicaciones divididas de nutrientes pueden o no combinarse con otras labores como las de protección de cultivos. En estos casos, no se deben retrasar operaciones sensibles al momento de aplicación.

Dónde colocar el nutriente

Decidir el lugar en donde colocar el nutriente consiste en entender la dinámica de los nutrientes en el suelo y su variabilidad espacial.

Colocar los nutrientes en el lugar preciso (horizontal y verticalmente) asegurara que estén disponibles para ser absorbidos por las raíces durante el crecimiento del cultivo. El sistema de distribución y colocación debe ser utilizado para aplicar los nutrientes en relación al crecimiento radicular. En la actualidad, con tecnologías como la de aplicación variable es posible variar la colocación dentro del lote en función de la disponibilidad de nutrientes en el suelo y de los rendimientos potenciales específicos por sitio.

Principios científicos para definir la colocación y distribución de los nutrientes

Conocer la dinámica del crecimiento radicular.

- Los nutrientes deben estar disponibles en el momento y en el lugar donde los necesitan las raíces. Las raíces de los cultivos anuales van explorando el suelo de manera progresiva con su desarrollo. La colocación del nutriente debe asegurar la intercepción por las raíces. Por ejemplo, la colocación en bandas de P a la siembra de maíz, incrementa significativamente los rendimientos a pesar de que las cantidades aportadas y las tomadas por el cultivo son muy pequeñas.

Manejar la variabilidad espacial dentro del lote.

- Los suelos afectan de manera heterogénea al rendimiento potencial de los cultivos. Se

deben evaluar las diferencias en el suministro y disponibilidad de nutrientes en el suelo, la vulnerabilidad de pérdida de nutrientes y la productividad de los cultivos dentro del mismo lote y entre lotes diferentes.

Identificar las zonas potenciales de pérdidas de nutrientes.

- Existen lotes o ambientes dentro de un lote en donde la vulnerabilidad de pérdidas de nutrientes por erosión, lixiviación, escurrimiento, volatilización o denitrificación son mayores. Se deben identificar las zonas para sostener los nutrientes dentro de límites aceptables.

Minimizar el riesgo de fitotoxicidad en el momento de la siembra.

- Evitar concentraciones elevadas de nutrientes junto a las semillas.

Cubrir deficiencias nutricionales agudas con aplicaciones foliares.

- Los requerimientos de micronutrientes (Zn, B, Mn, etc.) pueden ser cubiertos mediante la aspersión foliar. Asimismo, durante stress hídrico o en el momento de máximo crecimiento, deficiencias temporarias de S o Mg pueden ser cubiertas mediante la aspersión foliar.

Las “B” en el manejo adecuado de productos biológicos para la nutrición vegetal

Elaborado por Alejandro Peticari, INTA San Luis (2020)

Los procesos de disponibilidad e incorporación de nutrientes en las plantas se logran, y son naturalmente eficientes, con la participación de abundantes microorganismos. Algunos de estos, o sus productos derivados, al incorporarse en los planteos de producción aportan nutrientes en forma directa (ej. fijación de nitrógeno en la simbiosis de rizobios con leguminosas) o derivadas de su actividad sobre fracciones poco disponibles de estos (ej. *Pseudomonas* sp., *Penicillium bilaiae*, etc.) y al mejorar el crecimiento de las plantas y su capacidad captar los elementos (ej. *Azospirillum* sp.). Estos productos, conocidos como inoculantes, se presentan en diversas formulaciones y con variadas recomendaciones de uso dependiendo de los cultivos y condiciones de manejo por lo que para su aplicación responsable es importante considerar algunas pautas sobre la elección del inoculante, del proceso de aplicación y del manejo del cultivo.

Buena elección del inoculante

Los inoculantes son formulados que contienen microorganismos que contribuyen al crecimiento y la nutrición de las plantas. Algunos forman asociaciones con plantas de diferentes especies (ej. *Azospirillum* sp., *Pseudomonas* sp.) mientras que en el caso de los rizobios fijadores simbióticos de nitrógeno con leguminosas su relación es específica (Tabla 1). Además, estos inoculantes contienen cepas seleccionadas por su infectividad (capacidad de formar nódulos) y efectividad (capacidad de fijar el nitrógeno atmosférico).

Tabla 1. Principales especies de rizobios recomendables para producir inoculantes para leguminosas cultivadas en Argentina.

Cultivo	Género y especie de rizobio
Soja	<i>Bradyrhizobium japonicum</i> , <i>B. diazoefficiens</i>
Maní	<i>Bradyrhizobium</i> sp (Maní)
Lupino	<i>Bradyrhizobium</i> sp (Lupino)
Alfalfa, Melilotus, Medicago	<i>Ensifer melliloti</i>
<i>Lotus glaber</i> , <i>Lotus corniculatus</i>	<i>Mesorhizobium loti</i> - <i>M. huakii</i>
Garbanzo	<i>Mesorhizobium cicerii</i>
Poroto	<i>Rhizobium etli</i> , <i>R. tropici</i>
Arveja, Lenteja, Vicia	<i>Rhizobium leguminosarum</i> biovar <i>viceae</i>
<i>Trifolium</i> spp.	<i>Rhizobium leguminosarum</i> sv <i>trifolii</i>

En su composición los inoculantes tiene que contener una concentración (número) de rizobios viables tal que se logre una adecuada y rápida formación de nódulos. Los inoculantes tienen que prepararse y envasarse en condiciones de asepsia tal de estar libres de contaminantes.

Los tratamientos biológicos contienen, además de los microorganismos específicos a aportar otros compuestos que mejoran su actividad fisiológica, capacidad de nodulación y su tolerancia a condiciones de estrés. Los aditivos de osmoprotección permiten la aplicación de algunos inoculantes con anticipación al momento de la siembra y es recomendable su uso junto con procesos específicos para cada formulación, combinación con otros tratamientos de semillas y condiciones de aplicación y de manejo de las semillas tratadas (ej. temperatura y duración del almacenamiento).

Las condiciones de almacenamiento y de transporte de los inoculantes varían según formulaciones y presentaciones y es muy importante su consideración para el mantenimiento de la calidad de los productos. En la mayoría de los casos evitar la exposición directa al sol, a temperaturas superiores a los 20°C y su almacenamiento en contacto con productos químicos.

Buena elección de proceso de aplicación (inoculación)

La aplicación de los inoculantes se realiza mayormente a través del tratamiento de semillas y sólo en situaciones con alto riesgo para la sobrevivencia de los microorganismos es conveniente su uso en forma directa durante la operación de siembra (inoculación en el surco de siembra).

Al tratar las semillas se espera aportar los microorganismos a cada una tal que, independientemente de otros tratamientos y las condiciones de manejo de las semillas, se logre una suficiente cantidad en el momento de la siembra tal de lograr los propósitos de su uso (ej. formación de nódulos y fijación del nitrógeno, mejoramiento del crecimiento vegetal, etc.).

Los pasos para lograr una adecuada inoculación de las semillas se aplican indistinta-

mente del tipo de producto a utilizar y sitios de aplicación (i.e. en el campo, en un establecimiento rural o en un centro de tratamientos distante del campo). Una vez elegido el inoculante (y demás componentes) de acuerdo con el uso con otros tratamientos de semillas y condiciones de almacenamiento de las semillas tratadas, es importante la elección y calibración del equipo para la inoculación. El propósito es lograr que todas las semillas reciban cantidades equivalentes del inoculante sin afectar su calidad ni la calidad de las semillas tratadas. Las herramientas disponibles son variadas, entre las que se encuentran equipos para el tratamiento de las semillas en diferentes escalas según cantidades, tiempos y combinaciones de diferentes tipos de productos junto con la adaptación de implementos para la carga de semillas en la sembradora próximo al momento de la siembra. La aplicación directa en el cajón de semillas de la sembradora no logra una distribución apropiada del inoculante, quedan muchas semillas sin inocular, con sobredosificaciones de otros tratamientos y con pérdidas de productos por lo que en ninguna circunstancia es aconsejable su uso.

Del mismo modo que se requiere atender al cuidado de los productos a utilizar durante su transporte y almacenamiento es necesario considerar algunas pautas durante el proceso de inoculación. Entre estos es preferible su realización a la sombra, con temperaturas moderadas (inferiores a los 30°C) y dependiendo del tipo de tratamiento aplicado efectuar la siembra de las semillas tratadas. En el caso de la inoculación sin protectores microbianos o con formulaciones para su uso en el lote tratar las semillas y sembrar dentro de las 12 horas de aplicados los productos. Si las condiciones de riesgo de sobrevivencia de los microorganismos son altas (ej. aplicación combinada con terapicos con compatibilidad desconocida, con alta temperatura ambiente y baja humedad relativa, etc.) acortar la duración entre el tratamiento de la siembra a hasta 4 horas. En el caso de utilizar tratamientos anticipados de inoculación (“pre-inoculados”) el proceso, y las condiciones de cuidado, se extienden durante el almacenamiento de las semillas tratadas a realizar en ambientes frescos (temperatura media inferior a 20°C) y ventilados. En estos casos recordar rotular las estibas de semillas registrando la fecha de aplicación de los tratamientos tal que, dependiendo de las condiciones de almacenaje y formulación biológica aplicada, su siembra se realice dentro de los tiempos de efectividad de los productos aplicados.

Buenas condiciones de crecimiento de los cultivos

Los resultados de mejoramiento en la nutrición y en el crecimiento de las plantas derivado de la actividad de microorganismos seleccionados y aportados al inocular requiere del activo crecimiento de las plantas cultivadas. La actividad fotosintética (crecimiento) de las leguminosas provee de la energía requerida para la fijación del nitrógeno atmosférico con rizobios. El primer paso para este proceso es la formación de nódulos en las raíces en activo crecimiento requiriéndose de una rápida germinación y vigorosa implantación de los cultivos. Las condiciones hídricas de los suelos alteran la normal nodulación y actividad biológica. Al sembrar en suelos secos (contenidos de humedad inferiores al punto de marchitez permanente) se reduce la sobrevida de los inóculos limitando el logro adecuado de nódulos. En condiciones de salinidad o de anegamiento prolongado (mayor a 3 días) se limita el crecimiento de las plantas restringiendo la

energía para el sostenimiento de los nódulos y acelerando su mortandad.

La efectividad de los aportes de los tratamientos biológicos se extiende a todo el ciclo de crecimiento de las plantas. La implementación de buenas prácticas de manejo no solo contribuyen al cuidado del cultivo y su logro productivo sino también a la eficiente expresión de las contribuciones propósito de la inoculación.

En suelos con muy altas concentraciones de nitratos la nodulación se retarda y en condiciones extraordinarias se inhibe la actividad del sistema de fijación. Por el contrario, las limitaciones de otros nutrientes (fósforo, azufre, potasio, calcio y varios micronutrientes) reducen el crecimiento de las plantas durante su implantación disminuyendo así la formación de nódulos y consiguiente fijación del nitrógeno. En estas condiciones es importante la fertilización correcta considerando la disponibilidad e incorporación temprana de los nutrientes. así se logra tanto mejorar las condiciones para la formación inicial de nódulos (número) como su crecimiento (tamaño).

Las pautas para el uso eficiente de tratamientos biológicos integra la calidad de los inoculantes en concordancia con el proceso de aplicación (inoculación) en el contexto de un adecuado manejo del cultivo. Los buenos inoculantes dejan de serlo si falla su aplicación o cuando las plantas fallan en su crecimiento.

Resumen actualizado de información disponible para la implementación de buenas prácticas para el manejo de la fertilización de cultivos en Argentina

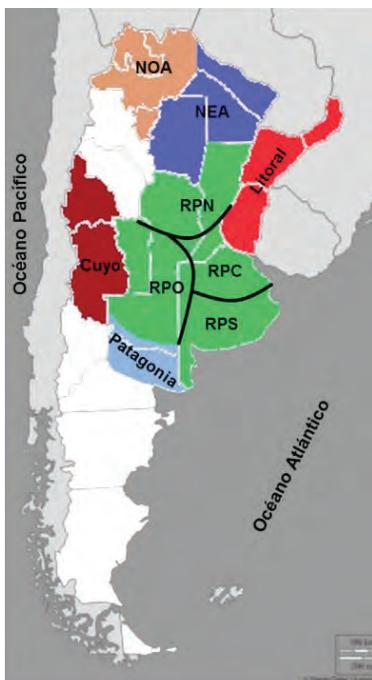
Adaptado de Fernandez Canigia (2017)

En Argentina, los estudios para el desarrollo de estrategias para el manejo de la nutrición de cultivos son abundantes y de actualidad, aportando información relevante para diseñar buenas prácticas de fertilización. La información proveniente de variadas fuentes de referencia ha sido compilada en publicaciones tales como la editada por Echeverría y García (2014) y comprende la mayoría de los cultivos de interés en sistemas agropecuarios argentinos (Tabla 3, Fig.7). Además, a partir de consultas personales a cada uno de los autores (Tabla 3), Fertilizar AC actualizó la información allí publicada considerando sus aportes personales y publicaciones complementarias tales como Echeverría y Sainz Rozas (2013); Esposito et al. (2014) a y b; Collino et al. (2015); Divito y Sadras (2015); Divito et al. (2015); Divito et al. (2016) a y b; Melchiori et al. (2014); Iriarte (2015) y Orcellet et al. (2015).

En la Tabla 4 se observa que los estudios de fertilización, a excepción de los correspondientes a plantaciones forestales, se concentran principalmente en las áreas tradicionales de producción de cada cultivo. El diagnóstico de necesidades de fertilización es, en la mayoría de los cultivos, sustentado con información desarrollada y adaptada localmente a partir de los análisis de suelos y en algunos cultivos complementados por análisis de plantas (i.e. composición total) o de tejidos (i.e. extractos de pecíolos u otros órganos) (Tabla 5). En

Tabla 3. Autores de estudios de manejo de la nutrición de cultivos en Argentina compilados en Echeverría y García (2014).

Cultivo	Autores
Trigo	Fernando García y Nahuel Reussi Calvo
Maíz y Sorgo	Hernán Echeverría, Hernán Sainz Rozas y Pablo Barbieri
Soja	Flavio Gutiérrez Boem y Fernando Salvagiotti
Girasol	Martín Díaz-Zorita
Colza	Martín Díaz-Zorita y María Virginia Fernández Canigia
Cebada, avena y alpiste	Pablo Prystupa
Pasturas y pastizales naturales	María Alejandra Marino y Angel Berardo
Papa	Hernán Echeverría y Claudia Giletto
Caña de Azúcar	Federico Pérez Zamora
Arroz	Juan José de Battista
Algodón	Mariana V. Sauer
Frutales de carozo y pepita	Enrique Sánchez y Mariela Curetti
Citrus	María F. Rivadeneira y Guillermo Banfi
Cultivos hortícolas: ajo, cebolla y tomate	Victor Lipinski y Silvia Gaviola
Yerba mate	Alberto Sosa
Forestales	Rafael Rubilar, Lee Allen, Thomas Fox, José Stape y Timothy Albaugh



algunos casos, se recomienda la utilización de otra información tales como la producción del cultivo anterior, balances aparentes de nutrientes, observaciones tales como índices verdes y síntomas de deficiencias en las plantas. En la mayoría de los cultivos considerados se dispone de recomendaciones locales para el manejo de la nutrición principalmente con N y con P y, en menor frecuencia, con S (Tabla 6). Las recomendaciones de manejo de microelementos (ej. zinc, boro, cobalto, molibdeno, etc.) son específicas para algunos cultivos (Tablas 6 y 7). Al establecer buenas prácticas de manejo de nutrición se consideran integralmente las necesidades agronómicas de los cultivos junto con su contribución esperada sobre los resultados productivos. En este aspecto, la información local si bien es abundante requiere en algunos casos de su continua actualización (Tabla 8).

Figura 7: Regiones argentinas consideradas en estudios de nutrición de cultivos a partir de la compilación de Echeverría y García (2014) y actualización por Fertilizar AC. RPS: Región pampeana Sur, RPC: Región pampeana Centro, RPO: Región pampeana Oeste, RPN: Región pampeana Norte, NEA: Noreste argentino, NOA: Noroeste argentino. Las áreas en blanco indican regiones sin información publicada.

Tabla 5. Regiones con disponibilidad de estudios de manejo de nutrientes para la producción de cultivos en Argentina a partir de Echeverría y García (2014) y actualización por Fertilizar AC. Las referencias y extensión de las regiones se describen en la Figura 7. Los espacios en blanco indican que no se mencionan esas regiones con estudios de fertilización o como zonas cultivadas

Cultivo	Regiones donde hay estudios en Argentina								
	RPS	RPC	RPO	RPN	Pat	Cuyo	Lit	NEA	NOA
Trigo	si	si	si	si			si		
Maíz	si	si	si	si					
Sorgo	si	si	si	si				si	
Soja	si	si	si	si			si	si	si
Girasol	si	si	si	si				si	
Colza	si	si	si	si			si		
Cebada	si	si	si	si					
Avena	si	si	si	si					
Alpiste	si	si	si	si					
Pastizales naturales	si	si	si	si	si			si	si
Pasturas perennes de gramíneas	si	si	si	si	si			si	si
Pasturas perennes de leguminosas	si	si		si				si	si
Pasturas consociadas	si	si					si	si	si
Pasturas anuales	si		si	si			si	si	
Papa	si								si
Caña de Azúcar									si
Arroz							si		
Algodón								si	
Frutales de carozo					si				
Frutales de pepita					si				
Naranja							si		
Mandarina							si		
Ajo					si	si			
Cebolla	si				si	si			
Tomate					si	si			si
Yerba mate							si		
Forestales									

Tabla 6. Métodos de diagnóstico recomendados para la determinación de necesidades de fertilización para la producción de cultivos en Argentina. “si”: hay información local, “no”: la información no hace referencia a estudios locales, los espacios en blanco indican ausencia de información.

Cultivo	Tipo de Análisis para diagnóstico		
	Suelo	Tejidos, plantas	Otros
Trigo	si	si	si
Maíz	si	si	si
Sorgo	si	si	si
Soja	si	si	si
Girasol	si	si	si
Colza	si		si
Cebada	si		si
Avena	si		si
Alpiste	no	no	no
Pastizales naturales	si	si	si
Pasturas perennes de gramíneas	si	si	si
Pasturas perennes de leguminosas	si		
Pasturas consociadas	si		
Pasturas anuales	si		
Papa	si	si	si
Caña de Azúcar	si	si	
Arroz	si		si
Algodón	si	si	si
Frutales de carozo	si	si	si
Frutales de pepita	si	si	si
Naranja	si	si	si
Mandarina	si	si	si
Ajo	si	si	
Cebolla	si	si	
Tomate		si	
Yerba mate	si		
Forestales			no

Tabla 7. Disponibilidad de recomendaciones para el manejo de la fertilización según cultivos y nutrientes independientemente de la utilización de herramientas de diagnóstico o indicaciones de respuestas esperadas de su aplicación. “si”: recomendación de fertilización según experiencias locales, “no” recomendación de no aplicar fertilizantes, los espacios en blanco indican que no hay información local de soporte.

Cultivo	Recomendación				
	N	P	K	S	Otro
Trigo	si	si	no	si	si
Maíz	si	si	si	si	si
Sorgo	si	si	si	si	si
Soja	si	si		si	si
Girasol	si	si			si
Colza	si	si		si	si
Cebada	si	si		no	
Avena	no	no		no	
Alpiste	si	no		no	si
Pastizales naturales	si	si			
Pasturas perennes de gramíneas	si	si			
Pasturas perennes de leguminosas	no	si		si	si
Pasturas consociadas	si	si			
Pasturas anuales	si	si			
Papa	si	si			
Caña de Azúcar	si	si	si		
Arroz	si	si	si		si
Algodón	si	no	si		
Frutales de carozo	si	si	si		si
Frutales de pepita	si	si	si		si
Naranja	si	si			si
Mandarina	si	si			si
Ajo	si	si			
Cebolla	si	si		si	
Tomate		si	si		
Yerba mate	si	si	si		si
Forestales					

Tabla 8. Reporte de resultados locales de respuesta neta (ej. en kg ha⁻¹) o relativa (en porcentaje) con respecto al tratamiento control sin fertilizar según nutrientes. “si”: con datos locales de respuesta; “sd”: sin indicación cuantificada de la respuesta descrita en el texto; “no”: la información local no muestra mejoras en rendimiento al aplicar el nutriente, los espacios en blanco indican ausencia de información. * Otros nutrientes con respuesta a su aplicación en estudios locales.

Cultivo	Regiones donde hay estudios en Argentina				
	N	P	K	S	Otro (*)
Trigo	si	si	no	si	si
Maíz	si	si	no	si	si
Sorgo	si	sd	no	sd	no
Soja	no	si		si	si
Girasol	si	si			si
Colza	si	si		si	si
Cebada	si	si		si	sd
Avena	sd	sd		sd	
Alpiste	sd	sd		sd	sd
Pastizales naturales	si	si			
Pasturas perennes de gramíneas	si	si			
Pasturas perennes de leguminosas	no	si		si	sd
Pasturas consociadas	si	si			
Pasturas anuales	si	si		si	
Papa	si	si		no	no
Caña de Azúcar	si	si			sd
Arroz	si	si	si		si
Algodón	no	no	no		
Frutales de carozo	si	si	si		
Frutales de pepita	si	si	si		
Naranja	no	no			
Mandarina	no	no			
Ajo	si	si			
Cebolla	si	si		si	
Tomate					
Yerba mate	si	si	si		sd
Forestales					

I Los nutrientes y la sustentabilidad

Adaptado de International Fertilizer Association (2016)

El manejo de nutrientes y la seguridad alimentaria

Cuando los nutrientes disponibles en el suelo son escasos limitan los rendimientos de los cultivos. Para producir suficiente alimento, de manera de satisfacer las crecientes demandas de alimentos, fibras y energía de un vigoroso crecimiento de la población mundial y reducir las huellas ambientales de la agricultura, es esencial mejorar el manejo actual de los nutrientes. El N, a nivel global, es el nutriente más limitante. Específicamente, en ausencia de los fertilizantes nitrogenados, se estima que a nivel global solo podríamos producir la mitad de lo que actualmente producimos (Erisman et al., 2008). Con la expectativa de que el crecimiento poblacional supere en el año 2050 los 9 mil millones de habitantes, junto con los cambios asociados al aumento del consumo de carnes, en las décadas siguientes la eficiencia en el uso de los fertilizantes tendrá un rol clave en la alimentación del planeta. Esto incluye fertilizaciones más balanceadas incluyendo no solo a los nutrientes esenciales sino también a los secundarios y a los micronutrientes.

Recientemente, la fertilización ha sido usada para resolver deficiencias de micronutrientes tanto en animales como en humanos. Por ejemplo, en lo que respecta al Zn, con una fuerte variación regional, se estima en un 21% a nivel global la proporción de población con riesgo de malnutrición en este elemento (Hotz y Brown, 2004). Las regiones en las que la población presenta deficiencias de Zn coinciden con los suelos que presentan niveles bajos de Zn, intervenir con fertilizaciones con Zn provee una opción interesante para incrementar tanto el rendimiento como la concentración de Zn en los granos, así se mejora el consumo de Zn de la población que cultiva en esos suelos (más detalles en www.harvestzinc.org).

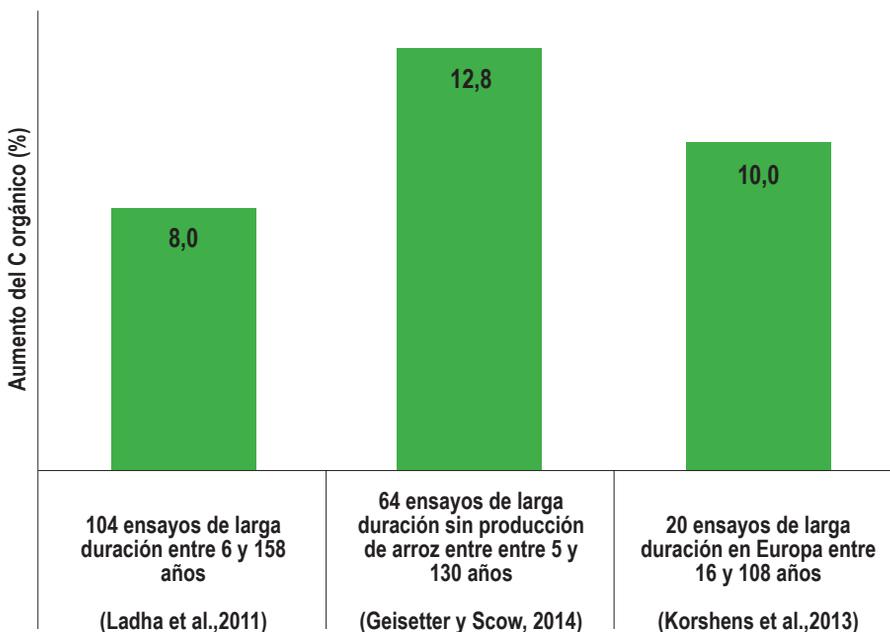
El manejo de nutrientes y la salud del suelo

Numerosos factores contribuyen a la calidad de los suelos. La propiedad fundamental que hace a un suelo saludable es su capacidad de proveer nutrientes en cantidades y proporciones adecuadas para el desarrollo de las plantas, lo que usualmente denominamos fertilidad del suelo. La fertilidad del suelo puede sostenerse mediante la incorporación de nutrientes equivalentes a los que fueron exportados y perdidos. Los factores físicos como la textura y la estructura son también componentes importantes de la calidad del suelo. Mientras que las actividades antrópicas pueden alterar la estructura del suelo, la textura es un componente mayormente inalterable. El factor clave de la calidad de un suelo es la materia orgánica (MO), la cual, si bien es relativamente pequeña, tiene una fuerte influencia sobre la estructura y por sus beneficios funcionales sobre la salud de suelo en general. La MO controla las poblaciones microbianas y sus numerosas funciones como la descomposición y el ciclado de los nutrientes. La MO colabora en aumentar la estabilidad de los agregados que contribuyen en la infiltración y retención de agua y, asociado a esto, disminuir el riesgo potencial de erosión de los suelos.

El uso de fertilizantes puede tener efectos positivos sobre la salud del suelo cuando se implementan las buenas prácticas de manejo, mientras que un mal uso puede impactar negativamente sobre las propiedades del suelo. Dependiendo del sistema de labranza utilizado, la utilización regular de fertilizantes puede mejorar los niveles de MO (Fig.8) mediante aumentos en la producción de residuos superficiales y subsuperficiales (raíces). Existen debates acerca del impacto del uso de fertilizantes minerales sobre la MO en agroecosistemas tropicales, y si estos estimulan el reciclado de la MO y de esta manera acelerarían su degradación. Sin embargo, experimentos de larga duración de todo el mundo, muestran que un adecuado y balanceado uso de fertilizantes minerales genera un incremento en la MO de los suelos comparado con las parcelas no fertilizadas.

Si se usa un fertilizante o mezcla inapropiada, por ejemplo, aplicando un balance inapropiado entre N y otros nutrientes esenciales, puede afectarse negativamente la salud del suelo a través de un rápido agotamiento de los nutrientes no aplicados. Además, con algunos fertilizantes existe un riesgo de acidificar el suelo. Esto puede ser beneficioso en suelos calcáreos, pero puede ser perjudicial en suelos con bajo pH si no se aplican con cal agrícola (encalado) para compensar el efecto de acidez.

Figura 8. Aumento en el C orgánico del suelo al fertilizar en comparación con controles sin fertilización en experimentos de larga duración de todo el mundo.



El efecto de los fertilizantes sobre las comunidades microbianas depende de la fuente de fertilizante, la dosis y el método de aplicación, el pH del suelo y del periodo de tiempo considerado. Los efectos negativos usualmente son localizados y efímeros. Por ejemplo, luego de aplicar fertilizantes granulados, la actividad microbiana puede reducirse por unas semanas, luego los niveles retornan a la normalidad. Experimentos de largo plazo muestran que el uso prolongado de fertilizantes de manera general conduce a incrementos en la biomasa microbiana del suelo (vinculado posiblemente con un aumento en la diversidad microbiana), y que generalmente la actividad microbiana se mejora más mediante el uso conjunto de enmiendas orgánicas con fertilizantes minerales.

Interacción entre el agua y los nutrientes

Las buenas prácticas en el uso de los fertilizantes pueden mejorar la productividad del agua tanto como un adecuado suministro de agua es necesario para incrementar la eficiencia de uso de los nutrientes. A menudo, aunque están íntimamente ligados, el manejo del agua y de los nutrientes se plantea por separado. Mejoras en la eficiencia de uso de nutrientes no pueden observarse solo como un aspecto del manejo de fertilizantes. Lo mismo ocurre con el manejo del agua.

El estrés hídrico dificulta el transporte de nutrientes desde el suelo hacia las raíces de los cultivos, así como afecta a los procesos químicos y biológicos del suelo, requeridos para una óptima absorción de nutrientes por las plantas. Las deficiencias de nutrientes reducen el desarrollo radicular y, al mismo tiempo la capacidad de los cultivos de usar el agua eficientemente. Es esencial mejorar las prácticas agronómicas para incrementar la producción por unidad de área, de agua y de nutrientes, que contribuye con la intensificación agrícola sustentable.

La influencia de los nutrientes sobre los rendimientos depende de la disponibilidad de agua, y además existe una interacción positiva entre estos dos componentes, y la importancia relativa de cada uno varía en función del grado de estrés que imponga cada componente. En general, la interacción entre los nutrientes y el agua tiene mayor impacto sobre los rendimientos que el impacto que tiene cada factor por separado. Por lo tanto, los dos factores deben ser manejados de forma integrada.

El manejo de nutrientes y el cambio climático

Manejando los nutrientes eficiente y efectivamente, los productores pueden:

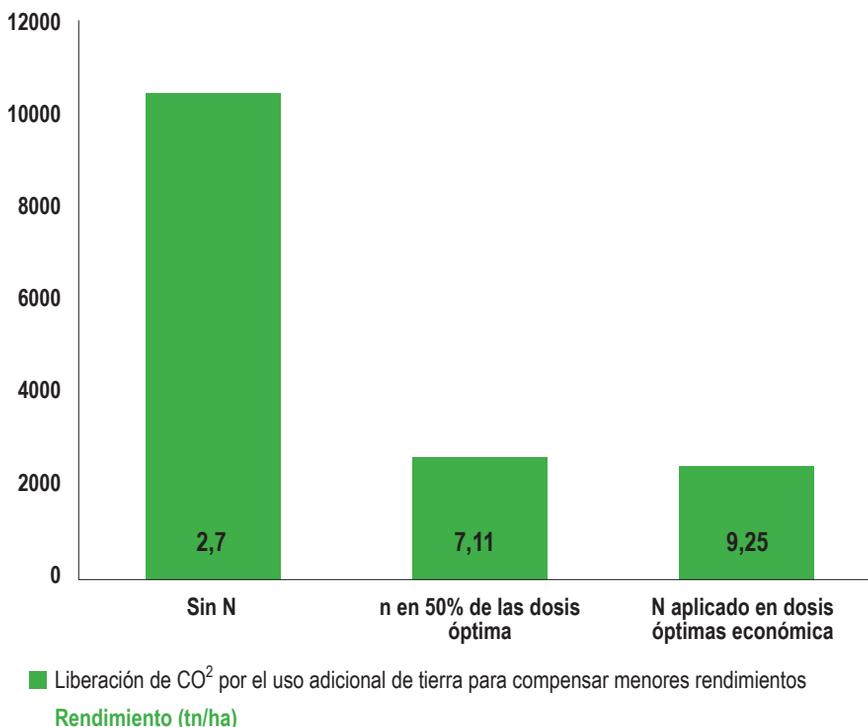
- Mejorar la adaptación al cambio climático;
- Prevenir la expansión de los cultivos sobre hábitats valiosos y sensibles;
- Reducir intensidad de las emisiones de óxido nitroso (N₂O); y
- Secuestrar carbono (C) en el suelo.

La expansión de la agricultura sobre áreas de bosques, pastizales o humedales libera cantidades significativas de dióxido de carbono (CO₂). Las grandes emisiones de CO₂ son

debido a la quema de arbustos y a la destrucción de los sumideros naturales de carbono. Debido al impulso en los rendimientos, los fertilizantes tienen potencial para prevenir la expansión agrícola sobre áreas sensibles y su relación con la emisión de gases de efecto invernadero y la pérdida de biodiversidad.

Cuando se aplican fertilizantes nitrogenados, parte de estos son tomados por los cultivos, parte permanecen en el suelo, otra parte es incorporada a la matriz de la materia orgánica y una fracción es perdida hacia el ambiente. Una de las partes perdidas es por la desnitrificación, en donde se libera nitrógeno (N_2) y óxido nitroso (N_2O). El N_2O es un gas de efecto invernadero que tiene un potencial de calentamiento global 300 veces más alto que el CO_2 . Algunas prácticas de manejo (por ej. evitar la aplicación de N en suelos anegados, utilizar fertilizantes de liberación controlada o con inhibidores de la nitrificación) tienen potencial para minimizar las pérdidas de N en forma de N_2O al mismo tiempo que se mejora la eficiencia en el uso del nutriente.

Figura 9. Emisiones de gases de efecto invernadero (CO_2 -eq kg/ha) para producir 9,25 tn de trigo bajo diferentes condiciones de fertilización con N. Resultados basados en el experimento de Broadbalk en Rothamsted Research. Promedio de 1996 a 2000 (Adaptado de Brentrup y Palliere, 2008)



Además, existe la posibilidad de reducir la intensidad de las emisiones, i.e. el total de emisiones de gas efecto invernadero (en términos de CO₂ equivalente) por unidad de producto cosechado (Fig.9). Es decir, si las emisiones de N₂O se incrementan, y la tasa de incremento es menor que el incremento de producción que lo acompaña, la intensidad de emisión es menor. Por la combinación de la reducción en la intensidad de las emisiones y la no expansión de la agricultura, en el futuro los alimentos pueden ser producidos comparativamente con menores emisiones de gas efecto invernadero que en la actualidad.

La fertilización puede incrementar la materia orgánica del suelo mejorando, si los residuos quedan en el suelo, el crecimiento de las plantas y las raíces. Debido a que los ciclos del C y del N están altamente vinculados en el suelo, el incremento de los aportes de C mediante los residuos puede inmovilizar N del suelo, reduciendo su disponibilidad para las plantas. Por otro parte, excesivos aportes de N pueden acelerar la descomposición de la MO del suelo. Ensayos de larga duración de todo el mundo muestran que un adecuado y balanceado uso de los fertilizantes minerales generan un incremento de la MO en comparación con las parcelas testigo sin fertilización (Fig.8). Los máximos incrementos de MO se logran con el uso conjunto de fertilizantes minerales y orgánicos.

La reforestación puede secuestrar grandes cantidades de C. La única opción para liberar tierras necesarias para el secuestro de C sin amenazar la seguridad alimentaria es intensificar la producción agrícola en los mejores suelos mediante el incremento en el uso de fertilizantes, rotaciones de cultivos y la adopción de buenas prácticas agrícolas y de uso del suelo. Los cálculos muestran que el secuestro de carbono supera significativamente las emisiones asociadas con la producción y uso del fertilizante adicional necesario (Vlek et al. 2004)

El manejo del suelo, especialmente el tipo de labranza también tiene mucha influencia sobre los niveles de MO del suelo. Una práctica adecuada de fertilización ofrece simultáneamente una opción interesante de secuestro de C en los suelos agrícolas y de mejora de la fertilidad del suelo y a la vez permite mitigar el cambio climático y mejorar la seguridad alimentaria.

Se espera que el cambio climático incremente las temperaturas y los eventos de estrés hídricos. El manejo de nutrientes provee una oportunidad para abordar estos eventos. La aplicación de fertilizantes fosfatados estimula el crecimiento radicular y como resultado otorga mayor resistencia a la sequía. Cationes como el potasio y el zinc también mejoran la tolerancia a estrés a través de diferentes mecanismos fisiológicos en las plantas. La fertilización balanceada es, por lo tanto, una importante herramienta disponible para que los productores se adapten al cambio climático.

Manejo de nutrientes y el ambiente

Adicionalmente al potencial de calentamiento global del N₂O (de fuentes orgánicas y minerales), la aplicación de nutrientes puede generar impactos ambientales de las siguientes formas:

- Depositiones acidas provenientes de emisiones antrópicas de dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y amoníaco (NH₃)

- Eutrofización de sistemas acuáticos (y terrestres) por incrementar los flujos de N y P desde los campos agrícolas hacia estos sistemas.
- Agotamiento del ozono estratosférico por las emisiones de N₂O
- Formación de material particulado seguido de la emisión de NH₃
- Acumulación de nitratos (NO₃) en agua subterránea.

Teniendo en cuentas las compensaciones, los agrónomos trabajan en la actualidad para desarrollar buenas prácticas de manejo de fertilizantes que minimicen los impactos sobre el ambiente mientras maximizan los beneficios. Todavía existe un amplio margen para aumentar la eficiencia y la eficacia a diferentes escalas, mediante el desarrollo y difusión de las buenas prácticas de manejo de los fertilizantes, en las cuatro áreas del manejo de nutrientes, que aborden la diversidad de agroecosistemas y sistemas agrícolas.

Manejo de fertilizantes desde el punto de vista de su impacto sobre el ambiente

Adaptado de Lavado (2016)

Los fertilizantes son compuestos simples que aportan elementos esenciales para el crecimiento de las plantas. En su mayoría son sales que contienen, entre otros elementos, nitrógeno, fósforo, potasio, azufre, para nutrir a las plantas tal como lo hace la naturaleza. El uso de fertilizantes es actualmente una práctica esencial e imprescindible de la actividad agropecuaria moderna. Su uso requiere la adopción de un manejo ambientalmente responsable porque la mala práctica puede conducir a efectos no deseados sobre el agroecosistema y su entorno dependiendo de las características de cada nutriente.

Entre los procesos ambientalmente negativos más importantes relacionados con el uso inadecuado de fertilizantes se encuentran la acumulación de nitratos en aguas subterráneas, la pérdida de óxidos de nitrógeno a la atmósfera y la contaminación de lagunas y ríos con fosfatos. Estos problemas pueden ser causados, por ejemplo, al utilizar un tipo de fertilizante inadecuado para el lugar, al aplicarlos fuera de los momentos convenientes o de consumo por las plantas, al agregar dosis muy elevadas, cuando son incorporados en una profundidad incorrecta, etc. También pueden ser causados por razones externas a decisiones productivas tales, como fenómenos meteorológicos extraordinarios y ataques de plagas.

Atendiendo a los procesos más frecuentes durante la utilización de fertilizantes en la producción de cultivos, es conveniente considerar las siguientes pautas para la reducción del riesgo de procesos tales como:

Contaminación de aguas subterráneas con nitratos

Este caso ocurre por el desplazamiento de nitratos hacia el subsuelo y su posterior ingreso a los acuíferos subterráneos. Los nitratos provienen no solo de los aportes al fertilizar con nitrógeno sino también de la mineralización del nitrógeno en la materia orgánica y los rastrojos, de aportes desde cultivos de leguminosas previas, fijación microbiana, lluvias, estiércol, efluentes industriales y urbanos, lixiviados de los rellenos sanitarios y basurales, líquidos cloacales y otras actividades humanas.

Las pérdidas por lixiviación dependen de muchos factores que el productor no puede controlar o lo hace indirectamente (ej. propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos; pendiente del lote; lluvias; características de crecimiento de los cultivos, etc.). Los riesgos de lixiviación aumentan cuando las dosis de fertilizantes son excesivas en relación con el consumo de los cultivos. El productor puede controlar el tipo de fertilizante utilizado, su dosis y momento de aplicación. Los cultivos son grandes consumidores de nitratos, por lo que, al aumentar sus rendimientos, el riesgo de lixiviación se reduce. Entre las prácticas para minimizar este proceso es conveniente:

- Evitar colocar todo el fertilizante nitrogenado en el momento de la siembra tratando de hacerlo cuando los cultivos han avanzado en su desarrollo y poseen una masa radical suficiente y abundante tasa de demanda para absorber los nitratos.
- Cuando el cultivo fertilizado no alcanza la producción prevista, por ejemplo, por ocurrencia de sequía, plagas u otros, implantar inmediatamente cultivos de cobertura. Así se absorberá el excedente de nitratos remanente en los suelos reteniéndolos en sus tejidos. Además de reducir el riesgo ambiental de acumulación de nitratos, también permite reducir la dosis de fertilizante del cultivo siguiente.

Emisiones de óxidos de nitrógeno a la atmósfera

Es un proceso natural que ocurre en los suelos independientemente de la fertilización y esta práctica es sólo uno de los factores participantes. La formación de los óxidos de N se debe tanto a la desnitrificación, que realizan microbios del suelo principalmente en condiciones de anegamiento, como a la nitrificación, que predomina en condiciones aeróbicas. El principal efecto ambiental de estos óxidos es su participación, junto con el dióxido de carbono, el metano y otros gases, en el efecto invernadero.

La principal pauta de manejo para no aumentar la desnitrificación es no aplicar los fertilizantes nitrogenados cuando los suelos presenten altos niveles de humedad, especialmente en siembra directa o cuando se pronostican condiciones meteorológicas muy húmedas. Prácticas agronómicas tales como posponer la fertilización o dividir las dosis contribuyen a reducir el riesgo de ocurrencia de este proceso. También, el uso de inhibidores de la nitrificación para obtener una liberación gradual de nitratos es potencialmente de utilidad.

Acumulación de fosfatos en lagunas y ríos

El P, disuelto o ligado a partículas de suelo, puede escurrir superficialmente alcanzando recursos hídricos superficiales (arroyos, ríos, lagunas, etc.) ubicados en las partes bajas del paisaje. El enriquecimiento en la concentración de fosfatos puede resultar en procesos de eutrofización, cambios en la composición y el crecimiento de la flora y fauna en lagunas y ríos que afectan la calidad del recurso natural y del agua para consumo humano y animal. El riesgo de este tipo de contaminación se puede reducir al aplicar los fertilizantes fosfatados incorporándolos en el suelo, especialmente en cultivos bajo siembra directa y paisajes con pendientes.

En nuestro país gran parte de los fosfatos presentes en aguas superficiales de la región pampeana tienen un origen natural. El fósforo del suelo es muy bajo para determinar una salida significativa de fosfatos disueltos vía escurrimiento. Adicionalmente, el vertido de aguas

servidas, y todo tipo de efluentes, desde los cascos urbanos y algunas industrias, son una fuente importante de fosfatos reactivos (por ej. detergentes, etc.), ajena al uso de los fertilizantes.

Transporte y almacenaje de fertilizantes

Como los fertilizantes son compuestos con alta concentración de nutrientes resultan en un foco de riesgo ambiental tanto durante su transporte como en el almacenaje en condiciones de campo. En este sentido se deben respetar las pautas de manipuleo descritas en las hojas de seguridad correspondientes a cada producto. Entre otras, por ejemplo,

- Manipulación y almacenamiento.
- Controles de exposición y de protección personal.
- Medidas para casos de derrame accidental.

La nutrición de los cultivos en sistemas agroecológicos

Elaborado por Martín Zamora y Agustín Barbera, CEI Barrow (INTA-MDA Tres Arroyos BA, 2020)

En los planteos agroecológicos se procura la adaptación de las decisiones agronómicas a los ambientes, en contraposición de buscar la modificación del ambiente para los cultivos que se desean establecer. Por lo tanto, la delimitación de ambientes es una herramienta fundamental para implementar dentro de los establecimientos agropecuarios. El conocimiento de esos ambientes y de sus limitaciones permiten definir las especies y variedades que vamos a utilizar en cada sitio, como así también su manejo.

El enfoque holístico y sistémico agroecológico de los establecimientos productivos agropecuarios permite manejar sistemas que buscan la regeneración de los recursos naturales, logrando producciones de alimentos, en cantidad y calidad, limitando su dependencia de insumos externos. Por ello, es fundamental reconocer y comprender que dichos sistemas, están sustentados en complejas y múltiples interrelaciones y procesos biológicos, y por lo tanto, su diseño y prácticas de manejo deben estar basadas en la aplicación de principios agroecológicos:

- Enfoque sistémico al planificar e implementar estrategias de manejo.
- Fomentar la preservación, conservación y regeneración de los recursos suelo, agua y biodiversidad.
- Fortalecer la inmunidad del sistema a través del funcionamiento apropiado de la regulación biótica (control de plagas y enfermedades) buscando el equilibrio de sus componentes.
- Balance de los sistemas regulatorios naturales, entre otros en los ciclos de nutrientes, balances de agua y de energía y la regulación de poblaciones bióticas.
- Asegurar el fortalecimiento de condiciones favorables de los suelos para el crecimiento de las plantas. En particular, a través del manejo y el ciclado de la materia orgánica y aumentando la actividad biótica de los suelos.

- Aumentar las interacciones biológicas y los sinergismos entre los componentes de la biodiversidad, promoviendo procesos y servicios ecológicos claves.
- Aumentar y sostener la productividad en el largo plazo.
- Aprovechar estratégicamente servicios ecosistémicos brindado por los animales.

Estos principios pueden ser aplicados a través de varias técnicas y estrategias. El fin último del diseño agroecológico es integrar los componentes del sistema (microbiología del suelo, artrópodos edáficos y aéreos, cultivos, especies vegetales espontáneas, animales, otros) de manera tal de potenciar las interacciones y la cooperación entre ellos, mejorando la eficiencia biológica general y el mantenimiento de la capacidad productiva y autosuficiente del agroecosistema. De este modo, se logran restablecer los procesos regulatorios del agroecosistema que conducen a la disminución, e incluso la total eliminación de productos agroquímicos de minimizando la dependencia a los insumos externos.

Los cultivos asociados para mejorar la eficiencia de nutrición de las plantas

La asociación de cultivos, al establecerse condiciones complementarias de nicho para el acceso a los nutrientes del suelo, es una de las principales herramientas de mejora en la eficiencia de nutrición de las plantas. Tal es el caso descrito por Hinsinger y col. (2011) al analizar los mecanismos que participan en la adquisición de fósforo en el contexto de cultivos asociados. Entre estos se destacan tanto la complementariedad espacial a través de distintos tipos de raíces de las plantas asociadas, como la complementariedad bioquímica por diferentes formas de extraer o movilizar el fósforo. También se infieren efectos facilitadores entre las plantas cuando una de las especies aumenta la disponibilidad del nutriente tanto para su captación como para la de la especie asociada. Por ejemplo, mediciones de P extractable, según el método de Olsen, fueron mayores en condiciones de policultivo trigo (*Triticum aestivum*) – garbanzo (*Cicer arietinum*) que en ausencia de cultivos o con cada especie producida individualmente. Además, el proceso de fijación biológica del nitrógeno (FBN), al liberar protones, acidifica el entorno de las raíces e incrementa la disponibilidad del P y otros nutrientes. También se conoce que la asociación entre cereales y leguminosas mejora la biodisponibilidad del Fe y del Zn (Xuey col., 2016) sustentando la contribución de principios agroecológicos para mejorar la eficiencia de nutrición de plantas en estos sistemas de producción.

Balance de nutrientes en sistemas integrados

La asociación de cultivos, principalmente de cereales con leguminosas, incrementa la disponibilidad de algunos nutrientes de suelo. Sin embargo, bajo un enfoque integral o sistémico, es importante mantener un balance al menos neutro entre las salidas (exportación por la cosecha de granos, extracciones ganaderas, etc.) y los ingresos de los nutrientes tales como el P. Los nutrientes que salen del sistema al vender la producción (granos, animales, etc.) provinieron del suelo y se debería reponer la misma cantidad para mantener ese balance neutro. Una alternativa es a partir de fertilizantes minerales, con procesamiento industrial en gran escala que en la actualidad son traídos a través de grandes distancias hasta los campos de cultivo. Otra forma de incorporar algunos nutrientes es a partir del compostajes, enmiendas o fertilizantes orgánicos, aunque son reconocidas sus dificultades para sistemas de producción de gran escala.

La implementación de sistemas integrados con ganadería, cuya dieta es suplementada con subproductos de la industria, logrando una correcta distribución de heces y orinas, permite

el ingreso de nutrientes al suelo y así balancear su reposición. Estos suplementos dietarios, entre otros, pueden ser el salvado o afrechillo de trigo (Tabla 1), el expeller de girasol o soja, que sean de origen local o regional (circuitos cortos de traslado). La distribución de estos suplementos es un elemento importante para considerar, recomendándose su disposición junto a las parcelas de pastoreo directo atendiendo al consumo diario por los animales. Por ejemplo, en el módulo agroecológico de la CEI Barrow (Tres Arroyos, BA) con vacunos de engorde bajo pastoreo directo de avena (*Avena sativa*) asociada con vicia (*Vicia villosa*) se distribuye diariamente afrechillo de trigo a razón de 3 kg por animal debajo de los alambrados eléctricos.

Tabla 1. Nutrientes en afrechillo de trigo, subproducto de industrias molineras pampeanas (NRC, 2000).

Elemento	Concentración (%)	Elemento	Concentración (mg/kg)
K	1,37	Zn	110
P	1,27	Mn	134
Mg	0,63	Cu	14
S	0,24	Se	157
Ca	0,14	Co	108
		Fe	163

Elementos de ciclos biogeoquímicos de nutrientes en el diseño de sistemas agroecológicos

La mayor proporción de los elementos que componen la masa de las plantas en crecimiento se incorpora por el proceso de fotosíntesis al fijarse el carbono y el oxígeno provisto desde la atmósfera y con aportes, proporcionalmente menores, de otros elementos. Estos elementos son esenciales para el funcionamiento de las plantas, y gran parte de ellos se encuentran en los suelos, siendo las raíces su lugar de ingreso a las plantas. Los nutrientes que en mayor cantidad aportan los suelos son nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) y en menor cantidad, pero igualmente necesarios encontramos otros elementos tales como azufre (S), calcio (Ca), magnesio (Mg), hierro (Fe) y cinc (Zn). Estos ciclos se denominan biogeoquímicos, porque los nutrientes se transforman en los ecosistemas bajo procesos químicos entre la parte mineral y la actividad de organismos vivos, siendo fundamental tener una elevada actividad biológica en los suelos para mantener su fertilidad.

En los planteos agroecológicos se logra una adecuada nutrición en las plantas de cultivo, a partir del fortalecimiento de la fertilidad de los suelos. Esta fertilidad es construida con estrategias de manejo que apuntan a aumentar la diversidad (de especies y raíces) y promover un abundante reciclado del material vegetal. Todo ello, buscando mantener la cobertura del suelo, potencia la actividad biológica del mismo, en un ciclo que se retroalimenta para los cultivos siguientes.

Para lograr este equilibrio algunas de las herramientas fundamentales son aumentar la biodiversidad de los lotes (ej. uso de policultivos con producción en mezcla de gramíneas con leguminosas), la integración de la ganadería con la agricultura (ej. planteos de producción mixta ganadero-agrícolas) y la utilización estratégica de subproductos de la agroindustria como suplementos de la dieta de los animales (ej. afrechillo de trigo en distribución en las parcelas de pastoreo directo, altas cargas instantáneas, poco tiempo de pastoreo y ubicación del acceso al agua). El manejo planificado del pastoreo atiende no solo a los beneficios o eficiencias productivas, sino también a la distribución uniforme de las deyecciones (heces

y orina) en los sitios de producción, mejorando el ciclado y balance de nutrientes, y permitiendo llegar a la implantación de un cultivo sin deficiencias nutricionales edáficas.

El nitrógeno fijado biológicamente por las leguminosas asociadas a los cultivos es variable dependiendo de las especies y condiciones ambientales, con rangos anuales entre 60 y 250 kg/ha. Para su efectivo aporte al sistema, si bien son procesos que ocurren de forma natural, es importante la inoculación con microorganismos específicos al sembrar las leguminosas, evitando altas concentraciones de nitratos en el suelo durante su implantación, ya que de esa manera se inhibe el proceso de fijación biológica.

El fósforo también es esencial para el crecimiento de las plantas y frecuentemente es un elemento limitante debido a que su cantidad disponible para las plantas es escasa. En planteos agrícolas actuales, el aporte de fertilizantes fosfatados busca compensar las limitaciones para su acceso por las raíces. Bajo una mirada sistémica, se reconocen algunos elementos a considerar para el diseño agroecológico, dado que estos fertilizantes se elaboran a partir de procesamiento de minerales (rocas) ricos en fosfatos y son un recurso agotable, consumiendo energía tanto en su extracción como en la transformación, acondicionado industrial, y trasladados hasta el sitio de aplicación (origen de las rocas, planta de procesamiento y lotes productivos). Además, hay que considerar que el enriquecimiento excesivo o inadecuado de los suelos en relación con la incorporación o consumo por las plantas, junto con procesos de lavado o de erosión, puede ser un foco de riesgo en masas de aguas por eutroficación y sus problemas asociados.

Es así que, para conducir eficientemente los ciclos biogeoquímicos de nutrientes, se integran un conjunto de medidas y mecanismos tales como potenciar los procesos de simbiosis con micorrizas y otros microorganismos, adaptaciones y complemento de los distintos sistemas radicales de cultivos asociados, potenciado así cambios químicos y biológicos en la rizósfera. La asociación de cultivos, que utilizan en forma diferente estos mecanismos químicos y biológicos, mejora la accesibilidad e incorporación de nutrientes en comparación con cultivos monoespecíficos.

Comentarios aplicados al manejo eficiente de la nutrición de cultivos con elementos agroecológicos

Para realizar cultivos bajo enfoques agroecológicos hay que mantener los suelos adecuadamente provistos de nutrientes disponibles para lograr un buen desarrollo, rendimientos y calidad de su producción. Es fundamental, la intensificación de procesos biológicos de mejora en el funcionamiento y eficiencia de los ciclos biogeoquímicos. Los balances de nitrógeno normalmente se alcanzan con la asociación de leguminosas a los cultivos, a partir de la fijación biológica y reciclado del nitrógeno atmosférico. Sin embargo, es importante analizar el balance de extracciones y contrastarlo con el efectivo aporte de la asociación junto con el seguimiento de algunos indicadores del suelo sobre el potencial de ciclado de nitrógeno (ej. Nan) y otros elementos (ej. P). Las herramientas de manejo de los nutrientes variarán dependiendo tanto de las escalas de producción como de los propósitos productivos y el acceso a recursos específicos o a su aplicación.

En los sistemas agroecológicos a gran escala se busca maximizar el beneficio de los servicios ecosistémicos ligados a las interacciones ecológicas entre las plantas, los animales y los suelos, accionando diferentes estrategias agronómicas. Los planteos productivos no son generalizables y se deben diseñar estrategias de manejo propias para el lugar y establecimiento, tal que cada cultivo cumpla con un objetivo económico y además ofrezca un suelo fértil para cultivos siguientes.

| ANEXOS

Muestreo de suelos: Instrucciones y pautas operativas

El análisis de suelos es una de las herramientas clave para conocer el estado de fertilidad química y física de los suelos, y contribuye a:

- Cuantificar el estado de fertilidad de los suelos ayudando a definir estrategias de fertilización de cultivos
- Conocer la evolución de propiedades físicas y químicas de los suelos
- Mejorar el conocimiento de un lote, por ejemplo, para decidir la compra de un campo.
- Evaluar los efectos de distintas secuencias de cultivos sobre la calidad del suelo,
- Identificar problemas edáficos específicos tales como acidez, alcalinidad, sodicidad, toxicidades, etc. para diseñar el uso de enmiendas u otras estrategias productivas.

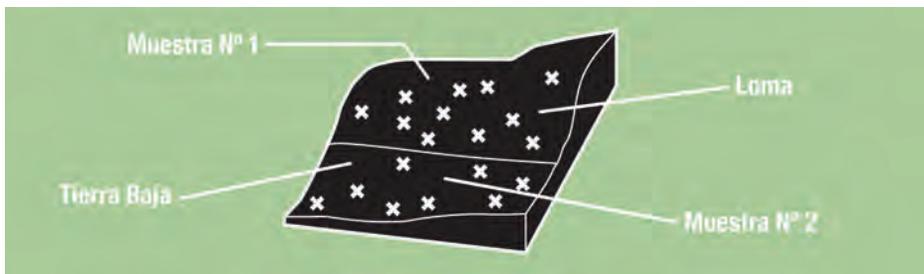
PAUTAS PARA TOMAR MUESTRAS DE SUELOS

El muestreo de suelos es la primera etapa en un programa de fertilización y uso de enmiendas (ej. Encalado). Es la fuente de error más importante. Para obtener resultados confiables la muestra debe ser representativa del sitio a caracterizar.

Paso 1: Diferenciar las áreas o unidades homogéneas de muestreo.

Defina áreas homogéneas según tipo de suelo, relieve, grado de erosión, cultivo previo, etc. No tomar muestras en manchones o sectores no representativos del sitio a caracterizar. Si estos manchones, son de magnitud significativa y ameritan un manejo diferencial, tomar las muestras por separado. Para identificar áreas homogéneas se pueden usar cartas topográficas, imágenes satelitales o aéreas y/o mapas de suelos o de rendimientos.

Evite tomar muestras en líneas de los cultivos, en particular en sitios con antecedentes de fertilización fosfatada localizada. Esto puede dificultarse en los casos en los que no podemos identificar la ubicación de dicha línea. Cuando no es factible identificar las líneas de cultivos de campañas anteriores realice un muestreo “apareado” (por cada una de las 15-20 submuestras tomadas al azar, tome una segunda submuestra separada de la anterior en un 50 % de la distancia entre surcos de la última campaña y perpendicularmente a la dirección de los mismos).



Paso 2: Materiales a utilizar para la toma de muestras:

- Palas
- Barrenos (o caladores): permiten tomar muestras con mayor uniformidad y rapidez pero no son recomendables de utilizar en suelos muy secos, compactos o con material rocoso.
- Balde o contenedor impermeable y limpio donde colocar las submuestras a medida que se recolectan.
- Bolsa de plástico resistente, limpia y rotulada para la correcta identificación de las muestras.

Precauciones:

- Rotular e identificar claramente las muestras.
- No utilizar bolsas o contenedores que hayan contenido fertilizante en algún momento.
- Limpie bien los elementos de muestreo al cambiar de potrero.
- El barreno debe estar bien afilado para producir un corte uniforme en todo el perfil.

Paso 3: Toma de muestras

La muestra enviada al laboratorio debe estar compuesta por varias submuestras. Cuanto mayor es la cantidad de submuestras, el muestreo será más representativo del sitio.

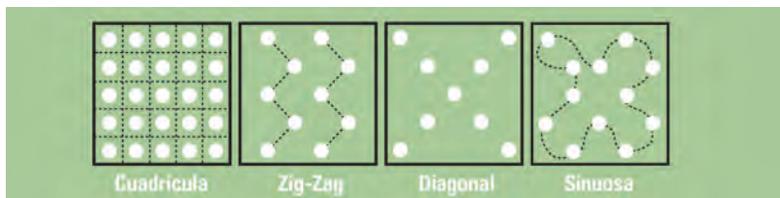
Número de muestras y submuestras:

- Cultivos extensivos: la superficie a relevar por cada muestra compuesta deberá abarcar entre 20 y 50 ha. Lotes de más de 50 ha. es recomendable tomar 2 muestras compuestas. La toma de cada submuestra deberá ser cada 2 ó 3 ha alcanzando así una muestra compuesta de entre 10 a 30 submuestras.
- Cultivos intensivos (quintas, frutales, huertas, etc.): la superficie a relevar por cada muestra compuesta deberá ser de hasta 1 ha ó 1 parcela tomando entre 10 y 30 submuestras por ha o parcela.

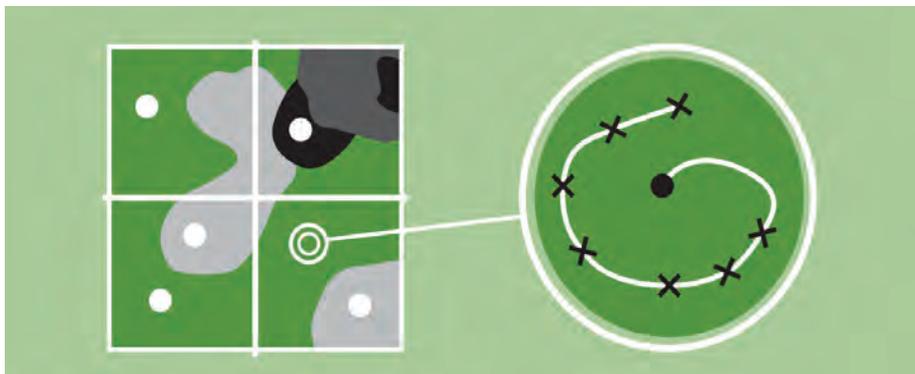
Criterios para la toma de muestras:

- **Muestreo al azar:** consiste en recorrer un lote al azar, recolectando sub-muestras que luego son mezcladas para formar una única muestra compuesta, la cual es enviada al laboratorio.

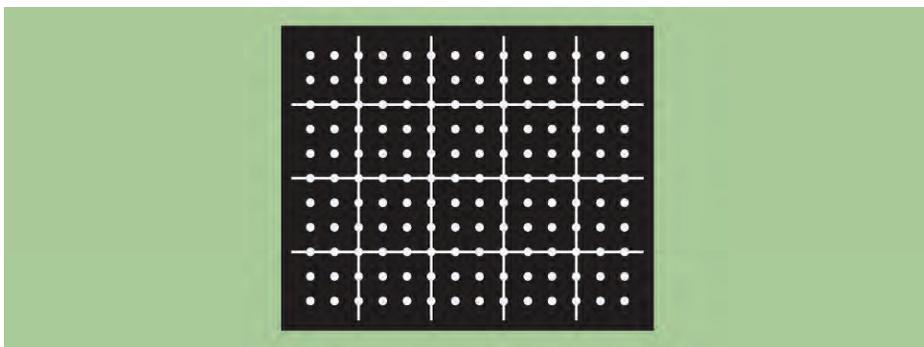
Recorrido para la toma de la muestra al azar:



- **Muestreo georeferenciado:** Se puede utilizar cuando el objetivo es evaluar los efectos de distintas secuencias de cultivos, o estrategias de recomposición sobre la calidad del suelo. Se elige un punto representativo del lote, se georeferencia y se toman submuestras alrededor de ese punto, luego se envía al laboratorio.



- **Muestreo sistemático o en grilla:** Es el método más apropiado si se está interesado en producir mapas para aplicación variable de fertilizantes. Con este método las muestras son tomadas a intervalos regulares en todas las direcciones, analizándose por separado. La equidistancia entre cada punto de la grilla se define según la autocorrelación espacial de cada nutriente a caracterizar.

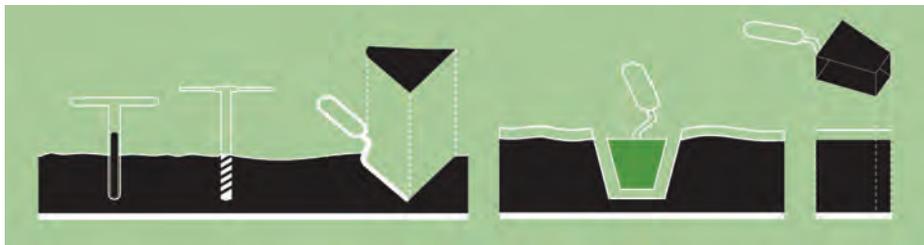


Paso 4. Extracción de las submuestras:

En cada punto de muestreo, retirar la cobertura vegetal, limpiar la superficie del suelo descartando todo lo que sea rastrojo o residuos de material vegetal.

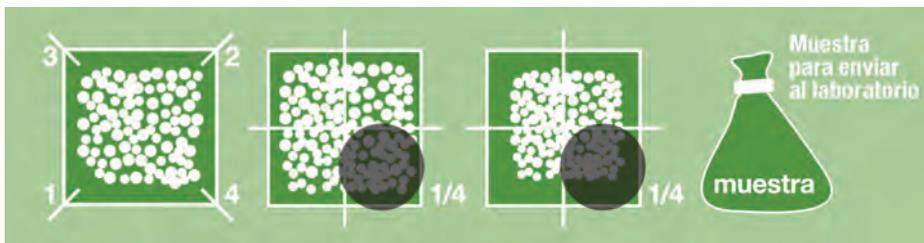
- Con barrenos: introducir hasta la profundidad deseada y extraer las submuestras, colocarlas en una bolsa grande o un balde.
- Con pala: efectuar cortes hasta la profundidad deseada. Cavar una primera palada ha-

ciendo un hoyo en forma de V, descartar el suelo al costado. Luego realizar una segunda palada de 3 cm de grosor aproximado, descartar los bordes y colocar en un balde o bolsa grande.



Una vez recolectadas todas las submuestras, romper los agregados hasta un tamaño de aproximadamente 1 cm y mezclar uniformemente.

Obtener el peso final recomendado por el laboratorio mediante el cuarteo de la muestra compuesta. Colocar el material sobre una lona o plástico limpios y mezclar. Luego dividir en 4 partes, conservar un cuarto. Volver a mezclar y repetir hasta llegar a la cantidad de muestra deseada. Embolsar y rotular.



Precauciones

- Tomar las submuestras alejadas 50 m de alambrados, aguadas, comederos, caminos, arboledas, cabeceras de lotes, sectores de carga y descarga de fertilizantes y construcciones.

Paso 5: Frecuencia de muestreo

- Para la mayoría de las determinaciones (pH, materia orgánica, fósforo extractable, cationes, etc.) el muestreo puede realizarse con anticipación a la siembra (ej, 45 días) permitiendo una adecuada planificación del uso de enmiendas y de fertilizantes de base.
- Para la determinación de nitratos la muestra debe ser tomada alrededor de los 15 a 20 días en que se realizará la aplicación del fertilizante correctivo.
- En horticultura, jardinería, invernáculos, etc. es aconsejable anualmente.

- Al evaluar la evolución de propiedades de suelos con cambios lentos (ej. Materia orgánica, pH, cationes intercambiables, etc.) la frecuencia de muestreo recomendable es cada 3 o 5 años independientemente de la época del año y del cultivo. Sin embargo, para una mejor evaluación es conveniente tomar las muestras en una misma época y cultivo.

Precauciones

- Evite muestrear inmediatamente luego de lluvias de más de 20 mm, especialmente para las determinaciones de nitratos.

Paso 6: Profundidad de muestreo y condiciones de humedad

- Para la mayoría de las determinaciones (materia orgánica, fósforo extractable, pH) la profundidad recomendada es de 0 a 20 cm.
- En el caso de diagnósticos de fertilización nitrogenada (evaluación de nitratos) tomar muestras hasta los 60 cm de profundidad (0-20 cm /20-40 cm /40-60 cm) o la profundidad considerada en método de recomendación a aplicar.
- Para situaciones en las cuales se sospecha salinidad y/o sodicidad, también se recomienda muestrear en los diferentes estratos: 0-20cm, 20-40cm y 40-60cm.

Precauciones:

- Al extraer muestras de diferentes profundidades evite contaminaciones de las submuestras eliminando el suelo superficial que haya caído durante la operación de muestreo. No mezclar las muestras de diferentes profundidades.
- Poner especial atención en suelos secos: respetar la profundidad elegida (el valor de P de 0-20 cm no es el mismo que 0-15cm).

Paso 7: Embalaje, identificación, conservación y envío de las muestras

- Envasar las muestras en bolsas de plástico, resistentes e impermeables.
- Identificar exteriormente cada bolsa (rotular) con todos los datos relevantes de caracterización de la muestra tales como:

Nombre del establecimiento u origen de la muestra.

Identificación del sitio o número de lote,

Profundidad de muestreo.

Observaciones y datos relevantes que contribuyan a la identificación y diagnóstico

- Conservar la muestra del suelo en un lugar fresco y enviarla dentro las 48 hs. al laboratorio. Si las muestras están muy húmedas, secarlas al aire sobre una lona o plástico en una capa no mayor a 2 ó 3 cm de altura (se debe tener la precaución de no contaminar la muestra utilizando una lona limpia).
- Para análisis de nitratos, envíe las muestras al laboratorio antes de las 48 hs y manténgalas refrigeradas (ej. en una heladera común o una conservadora de Telgopor con refrigerantes o hielo).

Precauciones

- No usar bolsas sucias ni que hayan contenido fertilizantes o semillas tratadas con fitosanitarios.
- No coloque la tarjeta con el rotulo identificadorio en contacto directo con el suelo.

Recomendaciones generales para el muestreo de suelos según el tipo de variable edáfica a determinar (Adaptado de Torres Duggan et al., 2010).

Variable	Intensidad (submuestras)	Profundidad (cm)	Época	Observaciones
MO, textura, cationes Intercambiables	20-25	0 a 20	Variable según objetivo.	En estudios de evolución de propiedades del suelo procurar tomar las muestras en épocas y bajo cultivos similares.
pH, CE	20-25	0 a 20	Variable según objetivo.	En suelos salinos o sódicos es recomendable tomar muestras en mayor profundidad.
Nitratos, sulfatos	20-25	0 a 60 (o según modelo de diagnóstico)	15 a 20 días antes de fertilizar	Evitar muestras en suelos saturados, no tomar muestras dentro de las 48 hs de precipitaciones abundantes.
Fósforo extractable	30-40	0 a 20	Presiembra	En sitios con antecedentes de fertilización localizada evitar muestras en líneas de cultivos anteriores o aplicar muestreos apareados.
Humedad gravimétrica	10	0 a 100 cm (o según objetivo).	Variable según objetivo.	

Pautas para el muestreo de tejido vegetal para análisis químico de nutrientes

El análisis de tejidos vegetales es una técnica que se utiliza para conocer el estado nutricional de las plantas. Se asume que la concentración de nutrientes de las plantas es el resultado de la interacción entre el cultivo, el ambiente y el manejo.

El análisis foliar o de la planta completa representa un análisis cuantitativo de los nutrientes en el tejido vegetal y es un complemento y no un sustituto del análisis de suelo. La información generada a través de análisis de plantas, junto a los resultados de los análisis de suelos, pueden ser una herramienta muy útil en la detección de problemas nutricionales.

Ventajas del análisis de tejidos vegetales:

- Verificar síntomas de deficiencias nutricionales.
- Identificar deficiencias asintomáticas (“hambre oculta”).
- Indicar interacciones entre nutrientes
- Localizar zonas del lote que se comportan en forma diferente.
- Evaluar el manejo nutricional de los cultivos.

Para realizar el muestreo se debe proceder con precisión debido a que el tipo de cultivo, estadio de crecimiento, tipo de tejido (planta entera, hojas, tallos, peciolo) y el nutriente en cuestión son variables que afectan a la interpretación de los resultados.

Paso 1: momento de muestreo y tipo de tejido

Se deben recolectar las mismas partes de las plantas y en el mismo estadio fenológico que los indicados en las referencias con las que se compararan los resultados.

En la tabla siguiente se detallan los procedimientos de muestreo para el diagnóstico en tejidos foliares de los principales cultivos extensivos (Correndo, A. y F. García. 2012).

Cultivo	Momento de muestreo	Tejido de la planta	Muestras ha ⁻¹	Referencias
Trigo	Emergencia - Macollaje	Planta entera, corte a 2.5 cm a ras de suelo	30	1, 2, 3, 4
	Encañazón - Inicios de floración	Hojas 1 a 4 desde el ápice	30-50	
Cebada	Emergencia de espiga	Planta entera (parte aérea)	30-50	1, 2, 4
Arroz	Macollaje - Inicio panojamiento floración	Hoja más joven completamente desarrollada hoja bandera	25-50	1, 2, 5
Maiz	V3-V4	Planta entera	15-30	1, 2, 3, 6
	Emergencia de estigmas	Hoja de la espiga u hoja opuesta y debajo de la espiga	15-30	
Sorgo	Inicios de macollaje	Hojas del tercio medio	30	1, 2, 8, 9
	Vegetativo o previo a panojado	Primer hoja madura desde el ápice	15-30	
	Floración	Hoja 2 desde el ápice	15-30	
Soja	Etapa vegetativa	Primer hoja madura desde del ápice, sin pecíolo	30-50	1, 2, 3, 10
	Plena floración – Inicio de formación de vainas		30-50	
Colza	Previo a floración	Lámina de la hoja más recientemente madura	30	11
Girasol	Inicios de floración	Hojas del tercio superior	30	1, 2, 12
Alfalfa	Primer floración	10-15 cm superiores	15-30	1, 3, 13
Algodón	Inicios de floración	Limbo de hojas adyacentes a las flores	30	1, 2, 14
Papa	A 30 cm de altura	Hoja superior desarrollada, sin pecíolo	30-50	1, 15, 16
	Llenado de tubérculos	Pecíolo de la cuarta hoja superior desarrollada	50-60	
Caña de azúcar	4 meses post-brotación	Hoja +3; hoja +1 = con 1er. lígula (región de inserción de la vaina madre), tercio medio excluyendo nervadura principal	20-30 por tallo uniforme	2, 17, 18

Referencias: 1) Jones, 1998; 2) Malavolta et al., 1997; 3) Jones, 1991; 4) Plank y Donahue, 2000; 5) Dobermann y Fairhurst, 2000; 6) Campbell y Plank, 2000b; 7) Voss, 1993; 8) Clark, 1993; 9) Cox y Unruh, 2000; 10) Sabbe et al., 2000; 11) Plank y Tucker, 2000; 12) Merrien et al., 1986; 13) Plank, 2000; 14) Mitchell y Baker, 2000; 15) Ulrich, 1993; 16) Westermann, 1993; 17) Gascho, 2000; 18) Gascho et al., 1993.

Paso 2: segregación del muestreo

Se debe tener un método de segregación del muestreo a fin de evitar el envío de muestras que hayan sido recolectadas en las siguientes condiciones:

- Períodos prolongados de estrés (climático o nutricional).
- Tejidos con daño mecánico, plagas o afectado por enfermedades.
- No muestrear plantas de edad, variedad, o estado general, visiblemente distintas a las predominantes en el cultivo que se desea evaluar.
- No muestrear plantas en estados de floración o fructificación avanzados
- No muestrear cultivos con pulverizaciones recientes de insecticidas o fungicidas.
- Borduras u hojas sombreadas dentro del canopeo.
- Tejido vegetal muerto

Paso 3: acondicionamiento de las muestras

La contaminación de las muestras de tejido vegetal con suelo es la principal fuente de error en la interpretación de los resultados.

Es importante incluir tanta información acerca del cultivo y del lote como sea necesario para la correcta interpretación.

Las muestras por enviar al laboratorio deben al menos acondicionarse de la siguiente forma:

- Secar las muestras con un trapo o papel higiénico.
- Para el transporte, colóquelas en bolsas o sobres de papel, lo que favorecerá la deshidratación.
- Nunca transporte las muestras en bolsas de polietileno, ya que podrían pudrirse o descomponerse.
- No es necesario mantener el tejido fresco para el análisis de tejidos.

Peso atómico y equivalente de algunos elementos, iones y sales

Peso atómico de los elementos

Nombre	Símbolo	Peso atómico
Aluminio	Al	26,97
Azufre	S	32,06
Boro	B	10,82
Calcio	Ca	40,08
Carbono	C	12,01
Cloro	Cl	35,457
Cobalto	Co	58,94
Cobre	Cu	63,54
Flúor	F	19
Fósforo	P	30,98
Hidrógeno	H	1,008
Hierro	Fe	55,85
Magnesio	Mg	24,32
Manganeso	Mn	54,93
Molibdeno	Mo	95,95
Nitrógeno	N	14,008
Níquel	Ni	58,69
Oxígeno	O	16
Potasio	K	39,096
Sodio	Na	22,997
Yodo	I	126,92
Zinc	Zn	65,38

Peso equivalente de algunos iones y sales

Símbolo químico o fórmula	Peso equivalente en gramos	Nombre común
Ca ++	20,04	Ion calcio
Mg ++	12,15	Ion magnesio
Na +	23	Ion sodio
K +	39,1	Ion potasio
Cl -	35,46	Ion cloro
SO 4 =	48,03	Ion sulfato
CO 3 =	30	Ion carbonato
CO 3 H -	61,01	Ion bicarbonato
Cl 2 Ca	55,49	Cloruro de calcio
SO 4 Ca	68,07	Sulfato de calcio
SO 4 Ca2H 2 O	86,09	Yeso

CO 3 Ca	50,04	Carbonato de calcio
Cl 2 Mg	47,62	Cloruro magnésico
SO 4 Mg	60,19	Sulfato magnésico
CO 3 Mg	42,16	Carbonato magnésico
NaCl	58,45	Cloruro de sodio
SO 4 Na 2	71,03	Sulfato de sodio
CO 3 Na 2	53	Carbonato de sodio
CO 3 HNa 2	84,01	Bicarbonato de sodio
KCl	74,55	Cloruro de potasio
K 2 SO 4	87,13	Sulfato de potasio
KCO 3	69,1	Carbonato de potasio
KCO 3 H	100,1	Bicarbonato de potasio
S	16,03	Azufre
SO 2	32,03	Dióxido de azufre
SO 4 H 2	44,54	Ácido sulfúrico
(SO 4) 3 Al 2 18H 2 O	111,07	Sulfato de aluminio
SO 4 Fe7H 2 O	139,01	Sulfato ferroso

Peso molecular de las formas iónicas absorbidas por las plantas

Forma iónica	Peso Molecular	Forma iónica	Peso Molecular
NO ₃ ⁻	62,01	Mn ⁺⁺	54,94
NH ₄ ⁺	18,042	Zn ⁺⁺	65,37
HPO ₄ ⁼	95,978	Cu ⁺⁺	63,54
H ₂ PO ₄ ⁼	96,986	BO ₃ ⁻⁻⁻	58,81
K ⁺	39,1	HBO ₃ ⁻⁻⁻	59,818
Ca ⁺⁺	40,08	H ₂ BO ₃ ⁻⁻⁻	60,826
Mg ⁺⁺	24,31	B(OH) ₄ ⁻	78,842
SO ₄ ⁼	96,06	MoO ₄ ⁻⁻	159,94
SO ₃ ⁼	80,06	Cl ⁻	35,45
Fe ⁺⁺	55,85	Na ⁺	32,06

Requerimientos nutricionales

	kg ha ⁻¹	N	P	PK	S	Ca	Mg	N	P	K	S	Ca	Mg
Trigo	4 000	104	17	66	17	10	14	72	14	14	6	1.5	9
	6 000	156	26	99	26	16	21	107	21	21	9	2.2	13
Soja**	3 000	195	18	101	12	42	23	142	16	50	8	8	9
	5 000	324	30	169	19	69	39	237	27	83	14	13	15
Maíz	8000	150	27	130	27	21	21	102	21	27	10	1.4	11
	12000	226	41	195	41	31	31	153	31	41	14	2.2	16
Girasol	2 500	88	24	63	11	39	24	53	15	12	5	3	7
	4 000	140	39	102	18	63	39	84	24	19	8	5	11
Cebada	4 000	91	14	66	14	68	-	62	11	14	7	5	-
	6 000	136	21	99	22	102	-	93	16	21	10	7	-
Sorgo granifero	6 000	154	23	107	19	-	23	102	19	20	11	-	7
	9 000	231	34	160	29	-	35	152	28	30	16	-	10
Colza	2 000	110	28	120	22	61	18	70	20	51	13	-	-
	3 000	166	41	179	33	91	28	104	30	77	20	-	-
Arroz	9 000	174	31	205	7	22	19	115	26	21	5	0.9	8
Arveja	2 500	91	11	52	4	-	9	65	9	17	2.5	-	2.7
Caña de azúcar	100 000	143	19	174	44	87	49	83	11	78	26	47	33
Alfalfa***	15 000	405	38	315	53	180	45	-	-	-	-	-	-
Raigrás	5 000	125	14	93	13	25	18	-	-	-	-	-	-

*Rendimientos expresados a humedad comercial. **Una proporción significativa (~50%) del N es aportado por fijación biológica. ***Producción de materia seca. Referencia: Ciampitti I, y F. García. 2007. Archivo Agronómico No. 11. Requerimientos Nutricionales – I. Cereales, Oleaginosos e Industriales. Informaciones Agronómicas del Cono Sur No. 33. Marzo 2007. IPNI Cono Sur.

Análisis de nutrientes en plantas y rangos de concentraciones de suficiencia

Momento	TRIGO		MAÍZ		SOJA	
	Emergencia – Macollaje ¹	Encañazón-Inicio Floración ²	V3 - V4 ³	R1 ⁴	Etapas Vegetativas ⁵	R2 - R3 ⁵
Hojas por muestra	30 - 50		15 - 30		30 - 50	
Macronutrientes (%)						
N	4.0-5.0	1.75 - 3.3	13.0 - 5.0	2.7 - 4.0	3.5-5.5	13.25 - 5.5
P	0.2 - 0.5	0.2 - 0.5	0.3 - 0.8	0.20 - 0.50	0.30-0.60	0.26 - 0.60
K	2.5 - 5.0	1.5 - 3.0	2 - 5.0	1.7 - 3.0	1.7-2.5	1.5 - 2.5
S	0.15 - 0.65	0.4	0.15 - 0.4	0.10 - 0.60	-	0.20 - 0.60
Ca	0.2 - 1.0	0.21 - 1.4	0.25 - 1.6	0.20 - 1.00	1.1-2.2	0.2 - 2.0
Mg	0.14 - 1.0	0.16 - 1.0	0.3 - 0.8	0.15 - 1.00	-	0.25 - 1.00
Macronutrientes (ppm)						
B	1.5 - 4.0	5 - 20	5 - 25	4 - 25	-	20 - 60
Cu	4.5 - 15	5 - 50	5 - 25	5 - 25	-	4 - 30
Fe	30 - 200	21 - 200	30 - 300	11 - 300	-	21 - 350
Mn	20 - 150	16 - 200	20 - 160	15 - 200	-	20 - 100
Mo	0.1 - 2.0	0.4 - 5.0	0.1 - 2.0	0.15 - 0.2	-	0.5 - 1.0
Zn	18 - 70	20 - 70	20 - 50	15 - 100	-	15 - 80

¹ Trigo: Planta entera a 2.5 cm a ras del suelo. ² Trigo: Hojas ¹a-⁴ desde el ápice. ³ Maíz: Planta entera. ⁴ Maíz: Hoja de la espiga u opuesta y debajo.
⁵ Soja: Primer trifoljo maduro desde el ápice, sin peciolo. **Referencia:** Corredo A. y F. García (2012). Archivo Agronómico No. 14. Concentración de nutrientes en planta como herramienta de diagnóstico. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica No.5, Marzo 2012. IPNI Cono Sur

I Referencias

Brentrup, F. y C. Palliere. 2008. GHG emissions and energy efficiency in European nitrogen fertiliser production and use. *Proceedings 639, International Fertiliser Society, York, UK.*

Ciampitti, I. y F. Garcia. 2007. *Archivo Agronómico No.11. Requerimientos nutricionales – I. Cereales, Oleaginosos e Industriales. Informaciones Agronómicas del Cono Sur No.33*

Collino, D.J., F. Salvagiotti, A. Peticari, C. Piccinetti, G. Ovando, S. Urquiaga y R.W. Racca. 2015. Biological nitrogen fixation in soybean in Argentina: relationships with crop, soil, and meteorological factors. *Plant Soil* 392: 239-252.

Correndo, A. y F. García. 2012. *Archivo Agronómico No14. Concentración de nutrientes en planta como herramienta de diagnóstico. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica No.5.*

Diaz-Zorita y Fernandez Canigia. 2016. El aporte de la microbiología para mejorar el uso de fertilizantes y reducir sus efectos ambientales. En Lavado, R.S. *Sustentabilidad en los agrosistemas y uso de fertilizantes. Buenos Aires (Argentina), 225-241*

Divito, G.A. y V.O. Sadras. 2014. How do phosphorus, potassium and sulphur affect plant growth and biological nitrogen fixation in crop and pasture legumes? A meta-analysis. *Field Crops Res.* 156: 161-171

Divito, G.A., H.E. Echeverría, F.H. Andrade y V.O. Sadras. 2015-. Diagnosis of S deficiency in soybean crops: Performance of S and N:S determinations in leaf, shoot and seed. *Field Crops Res.* 180: 167-175.

Divito, G.A., H.E. Echeverría, F.H. Andrade y V.O. Sadras. 2016a. N and S concentration and stoichiometry in soybean during vegetative growth: Dynamics of indices for diagnosing the S status. *Field Crops Res.* 198: 140-147.

Divito, G.A., H.E. Echeverría, F.H. Andrade y V.O. Sadras. 2016b. Soybean shows an attenuated nitrogen dilution curve irrespective of maturity group and sowing date. *Field Crops Res.* 186: 1-9.

Echeverría, H y F. García. 2014. *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. 2da Ed. Bs As. Ed. INTA. 904 pp*

Echeverría, H. y H. Sainz Rosas. 2013. *Revisión bibliográfica de trabajos en fertilización en trigo y cebada en la región pampeana. Fertilizar AC, Buenos Aires (Argentina). 58 pp. No publicada.*

Erisman, J.W., M.A. Sutton, J. Galloway, Z. Klimont y W. Winiwarter. 2008. How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience* 1, 636 – 639.

Espósito, G., M. Díaz-Zorita, G. Balboa, C. Cerliani y G. Martínez Bologna. 2014. *Revisión de estudios de fertilización de cereales en Argentina. En: Actas del XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo - II Reunión Nacional "Materia Orgánica y Sustancias Húmicas". Producción sustentable en ambientes frágiles. Bahía Blanca, Bs. As., 5-9 mayo. 2014. AACS (ed.). Argentina.*

Espósito, G., M. Díaz-Zorita, G. Balboa, C. Cerliani y G. Martínez Bologna. 2014b. *Revisión de estudios de fertilización de cereales en Argentina. Fertilizar Asociación Civil - Universidad Nacional De Río Cuarto. Informe Final. Buenos Aires. Argentina. 8 pp. No publicada*

Fernandez Canigia, M.V. 2017. *Resumen actualizado de información disponible para la implementación de buenas prácticas para el manejo de la fertilización de cultivos en Argentina. Fertilizar AC, Buenos Aires (Argentina), 9 pp. No publicado.*

Geiseller, D. y K.M. Scow. 2014. Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms. A review. *Soil Biol. Biochem.* 75: 54-63.

Hotz, C. y K.H. Brown. 2004. Assessment of the risk of zinc deficiency in populations and options for its control. *Food Nutr. Bull.* 25: 94–204.

IFA. 2009. *The Global "4R" Nutrient Stewardship Framework for Developing and Delivering Fertilizer Best Management Practices. International Fertilizer Industry Association, Paris, France.*

International Fertilizer Association. 2016. *Nutrient Management Handbook. 25 pp.*

IPNI. 2012. 4R de la nutrición de plantas: un manual para mejorar el manejo de la nutrición de plantas. T. W. Bruulsema, Paul E. Fixen y Gavin D. Sulewski (ed.). Traducción al español. IPNI. Acassuso, Buenos Argentina. ISBN 978-987-24977-5-0.

Triarte, L.B. 2015. Cultivo de colza: comportamiento varietal y manejo. En: XXIII Congreso AAPRESID. BioSa-piens. La Era del Suelo. Rosario. Santa Fe, 5-7 Ago 2015. AAPRESID. Argentina.

Körschens, M., E. Albert, M. Armbruster, D. Barkusky, M. Baumecker, L. Behle-Schalk, R. Bischoff, Z. Čergan, F. Ellmer, F. Herbst, S. Hoffmann, B. Hofmann, T. Kismányoky, J. Kubat, E. Kunzova, C. Lopez-Fando, I. Merbach, W. Merbach, M.T. Pardor, J. Rogasik, J. Rühlmann, H. Spiegel, E. Schulz, A. Tajnsek, Z. Toth, H. Wegener y W. Zorn. 2013. Effect of mineral and organic fertilization on crop yield, nitrogen uptake, carbon and nitrogen balances, as well as soil organic carbon content and dynamics: results from 20 European long-term field experiments of the twenty-first century. Arch. Agron. Soil Sci. 59: 1017-1040.

Ladha, J.K., C. Kesava Reddy, A.T. Padre y C. van Kessel. 2011. Role of nitrogen fertilization in sustaining organic matter in cultivated soils. J. Environ. Qual. 40: 1756-1766.

Lavado, R.S. 2015. Fertilizar AC zz pp. Inédito

Melchiori, R.J.M., L. Coll, P.A. Barbagelata y J.M. Pautasso. 2014. Respuesta a la fertilización con nitrógeno y azufre en el cultivo de colza. En: 1° Simpósio Latino Americano de Canola. Passo Fundo. 19-21 Ago 2014. RS. Brasil.

Orcellet, J.M., N.I. Reussi Calvo, H.E. Echeverría, H.R. Sainz Rozas, N. Diouisalvi y A. Berardo. 2015. Eficiencia de uso de nitrógeno en cebada en el sudeste bonaerense: efecto de aplicaciones divididas. Ci. Suelo (Argentina) 33: 97-105.

Torres Duggan y col. 2010. <http://www.tecnoagro.com.ar/laboratorio/suelos/muestreo-de-suelos-y-plantas-en-cultivos-extensivos-de-granos/>. Septiembre 2018

Vlek, P.L., G. Rodriguez-Kuhl y R. Sommer. 2004. Energy use and CO₂ production in tropical agriculture and means and strategies for reduction or mitigation. Environment, Development and Sustainability 6: 213-233.

Zhang X., E.A. Davidson, D.L. Mauzerall, T.D. Searchinger, P. Dumas y Y. Shen. 2015. Managing nitrogen for sustainable development. Nature, doi: 10.1038/nature15743.

*Este documento cuenta con
el apoyo institucional de:*

