

Manejo de la fertilidad del suelo en planteos orgánicos



*Carina R. Álvarez y
Helena Rimski-Korsakov (Editoras)*

EFA



EDITORIAL FACULTAD AGRONOMÍA
UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES



E.F.A Santa Lucia, Corrientes. Título de la obra: “EL GRAN SUELO”, mural ganador del Tercer premio en el concurso “Pintemos el Suelo” organizado por AACCS-FEDIAP en el año Internacional de los suelos (2015).

FACULTAD DE AGRONOMÍA
Universidad de Buenos Aires
EDITORIAL FACULTAD DE AGRONOMÍA
DIRECTOR
Ing. Agr. Antonio J. Pascale
SECRETARIO ADMINISTRATIVO
Dr. Patricio T. Murphy
Primera Edición: Marzo de 2016

Queda hecho el depósito que marca la ley 11.743
Reservados todos los derechos. Prohibida la reproducción o uso tanto en español o en cualquier otro idioma, en todo o en parte por ningún medio mecánico o electrónico, para uso público o privado, sin la previa autorización por escrito de la editorial y los autores.

ISBN 978-987-3738-08-1



EDITORIAL FACULTAD DE AGRONOMÍA
UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES
Avda. San Martín 4453 – (1417) Bs. As., Argentina
e-mail: efa@agro.uba.ar

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. Producción orgánica en Argentina. Legislación y principios del manejo de la fertilidad de suelos en producciones orgánicas	
<i>Álvarez, C. R., Rimski-Korsakov, H.</i>	5
CAPÍTULO 2. Limitantes de la capacidad productiva del suelo	
<i>Rimski-Korsakov, H., Álvarez, C. R.</i>	15
CAPÍTULO 3. Limitantes físicas de los suelos	
<i>Álvarez, C. R., Rimski-Korsakov, H.</i>	28
CAPÍTULO 4. Evaluación de la capacidad productiva de los suelos	
<i>Rubio, G., Taboada, M.A.</i>	45
CAPÍTULO 5. Materia orgánica del suelo	
<i>Rimski-Korsakov, H., Álvarez, C. R.</i>	59
CAPÍTULO 6. Nitrógeno	
<i>Rimski-Korsakov, H., Álvarez, C. R.</i>	70
CAPÍTULO 7. Fósforo	
<i>Álvarez, C. R., Gutierrez Boem, F.</i>	86
CAPÍTULO 8. Azufre	
<i>Gutierrez Boem, F.</i>	94
CAPÍTULO 9. Potasio, calcio, magnesio	
<i>Gutierrez Boem, F.</i>	101
CAPÍTULO 10. Micronutrientes	
<i>Gutierrez Boem, F.</i>	106
CAPÍTULO 11. Muestreo de suelos	
<i>Rimski-Korsakov, H., Álvarez, C. R.</i>	114
CAPÍTULO 12. Cultivos de cobertura	
<i>Rimski-Korsakov, H., Álvarez, C. R.</i>	121
CAPÍTULO 13. Abonos orgánicos	
<i>Álvarez, C. R., Rimski-Korsakov, H.</i>	134
CAPÍTULO 14. Productos biológicos	
<i>Caffaro, M. M.</i>	139
CAPÍTULO 15. Manejo de los nutrientes en planteos de producción orgánica	
<i>Fernández, P. L., Álvarez, C. R.</i>	155

PRÓLOGO

La presente obra reúne los conocimientos, básicos y aplicados, relacionados con el manejo de la fertilidad de los suelos en planteos de producción orgánica. Aborda el estudio y caracterización de la capacidad productiva de los suelos, profundiza sobre el conocimiento de la dinámica de la materia orgánica y los nutrientes para, finalmente, plantear el manejo integrado del suelo y su fertilidad, respetando los principios de la producción orgánica y sustentable. Este libro busca acompañar la asignatura de “Fertilidad de Suelos” de la Tecnicatura en Producción Vegetal Orgánica de la Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, así como ser un material de consulta de productores y técnicos asociados a la producción orgánica.

Carina Rosa Álvarez y Helena Rimski-Korsakov (Editoras)

Carina Rosa Álvarez. Ingeniera Agrónoma. Magister Scientiae en Ciencia del Suelo. Doctora en Ciencias Agropecuarias. Profesora Asociada de la Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
alvarezc@agro.uba.ar

María Marta Caffaro. Licenciada en Biotecnología. Magister Scientiae en Producción Vegetal. Ayudante Primera de la Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes de la Facultad de Agronomía, UBA. Profesional Adjunta CONICET.
caffaro@agro.uba.ar

Patricia Lilia Fernández. Ingeniera Agrónoma. Doctora en Ciencias Agropecuarias. Jefa de Trabajos Prácticos de la Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
fpl@agro.uba.ar

Flavio Hernán Gutiérrez Boem. Ingeniero Agrónomo. Magister Scientiae en Ciencia del Suelo. Doctor of Philosophy. Profesor Adjunto de la Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Investigador independiente CONICET.
gutierrez@agro.uba.ar

Helena Rimski-Korsakov. Ingeniera Agrónoma. Doctora en Ciencias Agropecuarias. Jefa de Trabajos Prácticos de la Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
rimski@agro.uba.ar

Gerardo Rubio. Ingeniero Agrónomo. Doctor en Ciencias Agropecuarias. Profesor Asociado de la Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Investigador independiente CONICET.
rubio@agro.uba.ar

Miguel Angel Taboada. Ingeniero Agrónomo. Magister Scientiae en Ciencia del Suelo. Doctor of Philosophy. Director del Instituto de suelos CIRN-INTA, Castelar. Investigador principal CONICET.
mtaboada@agro.uba.ar

CAPÍTULO 1

PRODUCCIÓN ORGÁNICA EN ARGENTINA. LEGISLACIÓN Y PRINCIPIOS DEL MANEJO DE LA FERTILIDAD DE SUELOS EN PRODUCCIONES ORGÁNICAS

Carina R. Álvarez y Helena Rimski-Korsakov

Definición de fertilidad de suelo

Una de las funciones del suelo es la de suministrar nutrientes a las plantas. El contenido de nutrientes de un suelo se conoce como fertilidad del suelo. Sin embargo, existen situaciones en que suelos fértiles son poco productivos. O sea, pueden existir suelos con altos contenidos de nutrientes que generan poca biomasa vegetal. Esto se debe a que los nutrientes están en el suelo, pero no llegan a las plantas por una serie de limitantes que lo impiden. Estas limitantes son la acidez, sodicidad, salinidad, hidromorfismo, capacidad de almacenamiento de agua. En general, estas limitantes son de difícil solución y requieren elevadas inversiones y, en consecuencia, condicionan la elección de alternativas productivas. Son problemas que muchas veces sobrepasan a los lotes y se difunden en áreas extensas. En contraposición, la presencia de nutrientes es fácilmente corregible y su manejo será uno de los ejes principales de este libro. Otro concepto importante es el de sustentabilidad. En sistemas agropecuarios la sustentabilidad es la condición de un sistema productivo de mantenerse en el tiempo indefinidamente sin degradar el ambiente ni agotar recursos, permitiendo a la vez el mantenimiento del ambiente socio-económico asociado.

Marco regulatorio para la certificación de producciones orgánicas en Argentina

La agricultura definida en términos generales como “ecológica” es amplia y abarca a la biológica, orgánica, biodinámica y otras que no utilizan en el sistema de producción productos de síntesis química. Las prácticas permitidas en el marco de la agricultura ecológica son normadas por cada país. En Argentina lleva el nombre “orgánica” y el organismo normativo es el SENASA (Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria).

Los productores que eligen producir en forma orgánica certificada deben cumplir con los requisitos de la legislación. En ella, se brindan una serie de normas que rigen la producción orgánica. En particular, en este capítulo abordaremos las que están relacionadas con el manejo del suelo en planteos de producción orgánica vegetal.

La certificación de producción orgánica argentina se apoya en una serie de reglamentaciones dictadas a partir de 1992 que son las bases del funcionamiento del sistema de

producción vegetal orgánica. Estas reglamentaciones son: Resolución SAGyP N° 423/92, SAGyP N° 424/92, IASCAV N° 82/92, IASCAV N° 62/92, SAGyP N° 354/93, IASCAV N° 42/94, IASCAV N° 116/94, IASCAV N° 331/94, IASCAV N° 188/95. Finalmente, en septiembre del año 1999 el Congreso Nacional aprobó y el Poder Ejecutivo Nacional promulgó la Ley 25.127 (SENASA, 2010a). Luego se dictan los decretos 97/2001 (SENASA, 2010b) que reglamenta la ley, y el 206/2001 que crea el PROGRAMA NACIONAL DE PRODUCCIÓN ORGÁNICA en jurisdicción de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación (IICA, 2010).

La ley 25.127 de producción orgánica en su Artículo 1 enuncia los principales lineamientos del manejo orgánico, según:

“A los efectos de la presente ley, se entiende por ecológico, biológico u orgánico a todo sistema de producción agropecuario, su correspondiente agroindustria, como así también a los sistemas de recolección, captura y caza, sustentables en el tiempo y que mediante el manejo racional de los recursos naturales y evitando el uso de los productos de síntesis química y otros de efecto tóxico real y/o potencial para la salud humana, brinde productos sanos, mantenga o incremente la fertilidad de los suelos y la diversidad biológica, conserve los recursos hídricos y preserve o intensifique los ciclos biológicos del suelo para suministrar los nutrientes destinados a la vida vegetal y animal, proporcionando a los sistemas naturales, cultivos vegetales y al ganado condiciones tales que les permitan expresar las características básicas de su comportamiento innato, cubriendo las necesidades fisiológicas y ecológicas”.

De este artículo, en relación al recurso suelo y el manejo de la fertilidad, se desprende el requisito de evitar la degradación del suelo desde el punto de vista físico, químico y biológico. En relación a la fertilidad expresa la importancia de mantener o incrementar los nutrientes del suelo, o sea tener una política de reposición y/o enriquecimiento del nivel de los mismos. Sin embargo, no pueden utilizarse fertilizantes de síntesis química para cumplir con lo anterior. Por otro lado, deben preservarse o intensificarse los ciclos biológicos del suelo, estando ligado a un buen contenido de materia orgánica edáfica. El uso sustentable de los recursos naturales también implica evitar la contaminación de suelo y agua.

La autoridad de aplicación de la ley, es el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación de la Nación, a través del Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA). El SENASA delega el proceso de certificación en empresas certificadoras privadas.

La resolución 423/92 en el artículo 5 inciso A, al igual que el Decreto 206/2001 Anexo III, dicen que tanto la fertilidad como la actividad biológica del suelo deberán ser mantenidas o incrementadas mediante:

- El laboreo mínimo apropiado del mismo.
- El cultivo de leguminosas, abono verde o plantas de raíces profundas.
- El establecimiento de un programa adecuado de rotaciones plurianuales.
- La incorporación al terreno de abonos orgánicos, obtenidos de residuos provenientes de establecimientos propios o ajenos, cuya producción se guíe por las normas del presente reglamento. En el caso de ser necesario, se podrán utilizar los fertilizantes orgánicos o minerales enumerados en el anexo A, previo control de su origen y composición.

El Anexo A de la resolución 423/92 enuncia los abonos, fertilizantes y mejoradores del suelo permitidos (Tabla 1).

Tabla 1. Abonos, fertilizantes y mejoradores del suelo permitidos en el Anexo A de la resolución 423/92.

Producto autorizado	Principal objetivo
Algas y productos derivados.	Aporte de materia orgánica y nutrientes
Aserrín.	Aporte de materia orgánica
Corteza vegetales y residuos de madera.	Aporte de materia orgánica
Compost de: residuos vegetales, provenientes del cultivo de hongos, de lombriz, de desechos domésticos orgánicos.	Aporte de materia orgánica y nutrientes
Estiércol de granja y gallinaza, líquido u orinas, compostados.	Aporte de materia orgánica y nutrientes
Harina de hueso y harina de sangre.	Aporte de materia orgánica y nutrientes
Paja.	Aporte de materia orgánica y nutrientes
Productos animales transformados procedentes de mataderos y de la industria del pescado.	Aporte de materia orgánica y nutrientes
Subproductos orgánicos de productos alimenticios y de la industria textil.	Aporte de materia orgánica y nutrientes
Turba.	Aporte de materia orgánica y nutrientes
Abonos foliares de origen natural.	Nutrientes
Inoculantes naturales.	Nutrientes/Reguladores de crecimiento
Conchillas.	Calcio/corrector de pH
Azufre.	Azufre/corrector de pH
Oligoelementos (boros, cobre, hierro, manganeso, molibdeno, zinc), (necesidad reconocida por la Empresa Certificadora).	Micronutrientes
Sulfato de magnesio (sal de Epson).	Azufre/magnesio
Sulfato de potasio de origen mineral.	Azufre/potasio
Arcilla (bentonita, perlita, vermiculita, etc.).	Sustrato
Caliza.	Calcio/corrector de pH
Creta.	Calcio/corrector de pH
Escorias Thomas, controlando su contenido en metales pesados.	Fósforo
Mineral de potasio triturado.	Potasio
Polvo de roca.	Nutrientes
Roca de fosfato de aluminio calcinada y roca fosfatada natural (hiperfosfato).	Fósforo
Roca de magnesio calcárea (dolomita).	Magnesio, Calcio, corrector de pH
Yeso.	Calcio/Azufre/corrector de pH
Cloruro de calcio (tratamiento foliar para manzanos por carencia de calcio). Producto adicionado en Resolución IASCAV 188/95.	Calcio

La resolución 423/92 también hace referencia al período de transición. Expresa que para que un producto reciba la denominación de orgánico, deberá provenir de un sistema donde se hayan aplicado las bases establecidas en el presente reglamento, durante no

menos de dos años consecutivos, considerándose como tales, a los productos de la tercer cosecha y sucesivas. En esta etapa recibirán la certificación de en transición. Sin embargo, el período de transición puede ser extendido o reducido, según los antecedentes de cada situación, por parte de las empresas certificadoras con consentimiento del SENASA. Ejemplos de estas variaciones son aquellas situaciones donde ya se usaban plaguicidas de origen natural (no derivados de síntesis química), donde puede aceptarse un menor período de transición, mientras que en los casos de sistemas donde se han utilizado clorados el lapso puede llegar a los cinco años (SAGPYA, 2010).

La resolución IASCAV 116/94 reúne una serie de datos acerca del suelo y de su manejo que deberán ser reportados para la certificación, como por ejemplo:

- Descripción del suelo.
- Tratamientos realizados de cada lote en relación a, cultivos, labranzas realizadas, abonos aplicados.
- Aspectos considerados a efectos de evaluar el aumento y continuidad de la diversidad del ambiente y mantenimiento o aumento de la fertilidad del suelo.
- Informar los análisis físicos, químicos y/o microbiológicos realizados por indicación del inspector. Dichos análisis deberán realizarse en cualquier caso que exista presunción de que se haya utilizado un producto no autorizado.

Características de la producción orgánica argentina

Australia es el país que posee mayor superficie manejada en forma orgánica certificada (17.2 Mha) a nivel mundial, ocupando Argentina el segundo lugar. Argentina ha mostrado un importante crecimiento de la superficie orgánica certificada en los últimos 15 años, sin embargo desde el año 2009 la misma se encuentra en paulatino descenso (Figura 1). La superficie certificada en el año 2014 fue de 3.1 Mha.

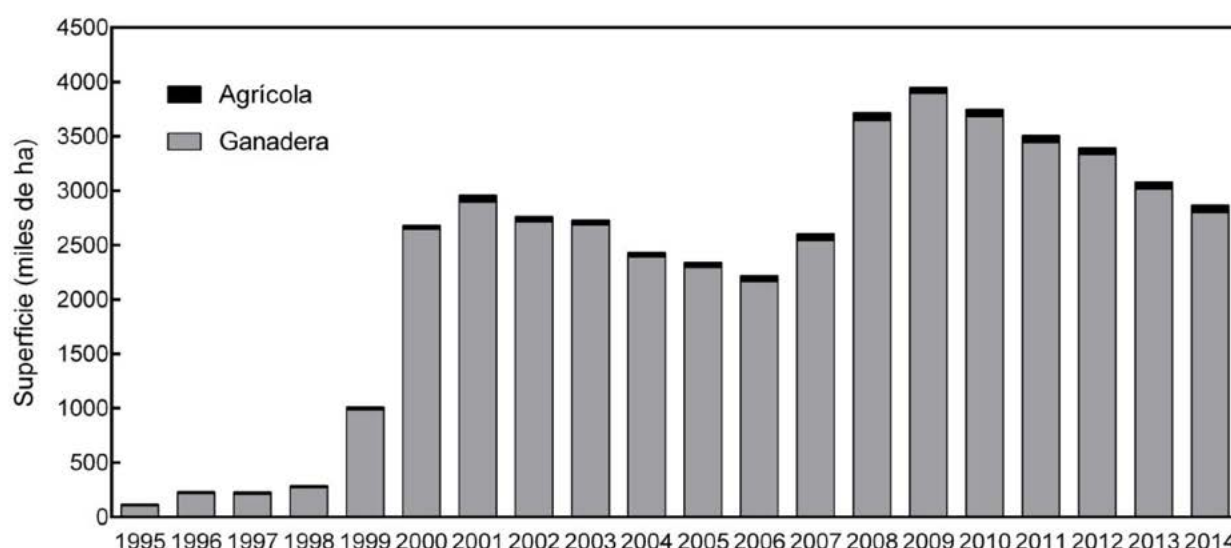


Figura 1. Evolución de la superficie ganadera y agrícola orgánica certificada cosechada en Argentina (Boari *et al.*, 2014, SENASA, 2015).

Esta superficie corresponde mayoritariamente a la actividad ganadera (2.8 Mha). En ese año la superficie agrícola certificada fue de 0.202 Mha. Es importante destacar que de este total solo se cosechó un 34% (0.0685 Mha).

La superficie ganadera se encuentra mayoritariamente ubicada en la Región Patagónica, en establecimientos de gran superficie, destinados a la producción de ganado ovino.

Por otra parte, la superficie agrícola cosechada se destina especialmente a los cultivos de cereales (trigo pan, arroz) y oleaginosos (soja y girasol; Figura 2). Siguen en importancia los cultivos industriales, destacándose dentro de este grupo la caña de azúcar y vid. En el caso de los cultivos frutales, lideran la manzana y pera y en los hortícolas, cebolla, ajo, zapallo y poroto.

El principal destino de la producción orgánica es el mercado externo; siendo el consumo interno un mercado de baja importancia caracterizado por la oferta de diversas hortalizas y frutas. Los principales destinos de nuestras exportaciones son Estados Unidos de América y la Unión Europea (SENASA, 2015).

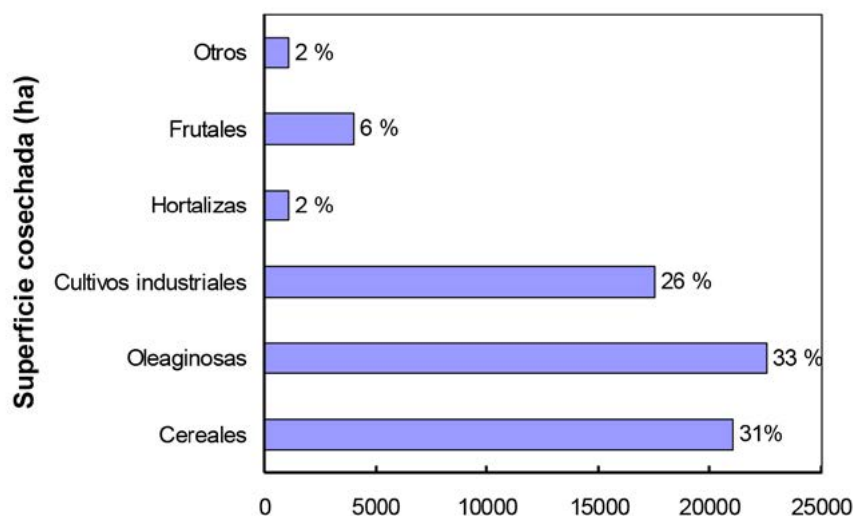


Figura 2. Distribución de la superficie agrícola cosechada por grupos de cultivos. Se presenta el valor en hectáreas y la importancia relativa (%) sobre el total año 2014 (SENASA, 2015).

Un factor importante a considerar son los rendimientos promedios de las producciones orgánicas en comparación con la agricultura convencional. Una aproximación es estimar los rendimientos a partir de las estadísticas anuales de producción orgánica (SENASA, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014) y compararlos con los rendimientos medios obtenidos en el país (Dirección Información Agropecuaria y Forestal, 2016). SENASA anualmente brinda un informe detallado de la evolución de la producción orgánica utilizando como información de base de las certificadoras. En la Figura 3 se presentan los rendimientos para los cultivos de trigo y soja promedio de 8 campañas agrícolas (2007 al 2014). La diferencia entre los rendimientos es más notoria en trigo, donde la relación entre el rendimiento medio de las producciones orgánicas y el rendimiento medio del país es de 0,4. En el cultivo de soja la diferencia es menor y la relación rendimiento orgánico/rendimiento convencional es de 0,65. Esta misma tendencia se detectó en una recopilación internacional, pero con menores brechas entre rendimientos de producciones orgánicas y convencionales. En dicha recopilación las relaciones de rendimientos orgánicos/convencionales fueron de 0,6 para trigo y de 0,9 para soja (Seufert *et al.*, 2012). Gran parte de estas diferencias de rendimientos las relacionan con problemas nutricionales, siendo el N el nutriente más limitante. Por ese motivo son menores las brechas de rendimientos encontradas en el cultivo de soja, debido en parte a la fijación biológica de la misma y, por ende, una mayor independencia con el N del suelo. En otro trabajo se realizó una recopilación de ensayos comparativos (producción orgánica vs. convencional) de larga duración de Estados Unidos, Europa y Australia (Kirchmann *et al.*,

2008). A partir de los mismos se elaboró la Figura 4, y se observó una disminución significativa del 20% de los rendimientos en la producción orgánica. La reducción del rendimiento por manejo orgánico en experimentos es menor que lo observado a nivel producción nacional, lo que puede atribuirse a un mejor manejo en los planteos orgánicos -control de malezas, abonos, fijación biológica- en los experimentos. En Argentina, el INTA Villegas en el ensayo de producción de alimentos ecológicos reporta rindes promedio (1996-2007) de 5070 kg/ha para maíz y de 1422 kg/ha para girasol (Álvarez *et al.*, 2009). Estos son considerablemente menores que los de condiciones convencionales de producción, poniendo en evidencia la restricción en la aplicación de fertilizantes y plaguicidas (Álvarez *et al.*, 2009). Por ejemplo, el ensayo de larga duración de labranzas de agricultura convencional en dicha experimental presenta rendimientos medios (1991-2001) de 8790 kg/ha para el cultivo de maíz (Barraco *et al.*, 2004). En Pergamino el primer año de experiencia en producción orgánica mostró buenos rendimientos para maíz, trigo y girasol, pero no así en soja (Bertín *et al.*, 2009).

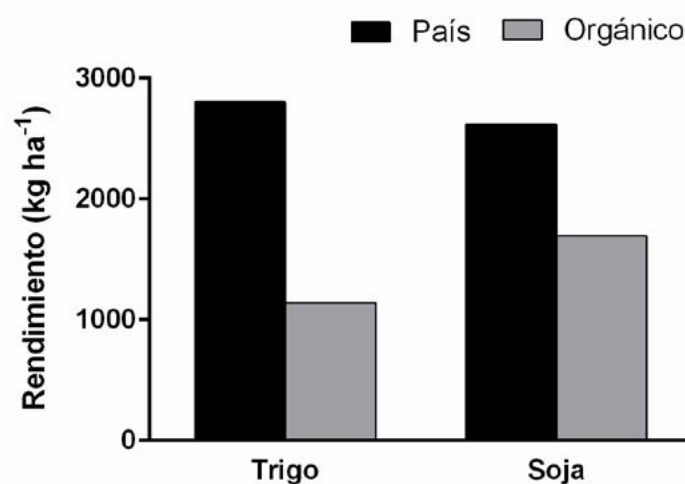


Figura 3. Rendimientos medios (2007 al 2014) de producciones orgánicas en Argentina estimadas a partir de SENASA (2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014). Se consideró la superficie cosechada de cada cultivo y la producción exportada más el consumo interno. Se compara con el promedio nacional del mismo período (Dirección Información Agropecuaria y Forestal, 2016).

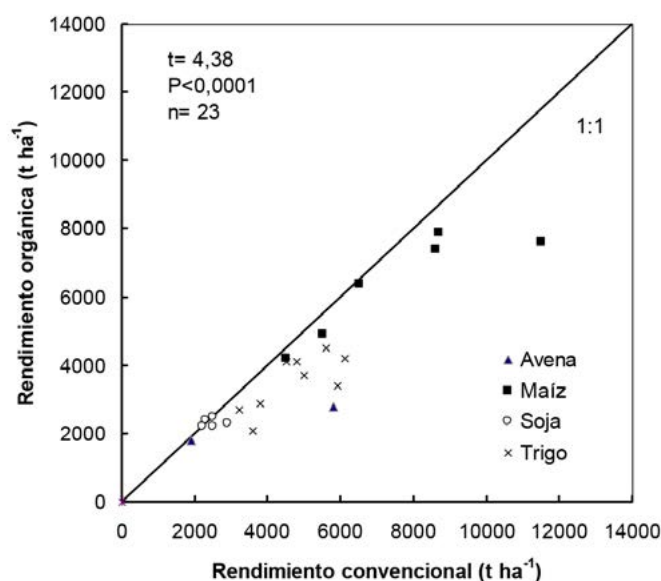


Figura 4. Relación entre rendimientos de diferentes cultivos extensivos de ensayos comparativos de sistemas de producción orgánicos vs. convencional de larga duración de Estados Unidos, Europa y Australia. Elaborado a partir de Kirchmann *et al.*, 2008.

Manejo de la fertilidad del suelo en planteos de producción orgánica

Los sistemas agroecológicos deben tener características similares a los ecosistemas naturales en equilibrio. Las características más importantes serían: alta diversidad de especies, ciclos minerales relativamente cerrados, baja relación biomasa cosechada y biomasa total y una adecuada actividad biológica del suelo (Altieri, 1994). El manejo de la fertilidad en sistemas de producción orgánica debe apoyarse en:

La diversificación de especies en el espacio y en el tiempo (policultivos, rotaciones de cultivos, sistemas agrícola-ganaderos, sistemas silvo-pastoriles): La diversificación de cultivos en el espacio o en el tiempo permite un aprovechamiento más eficiente de la disponibilidad temporal y en profundidad de los nutrientes y el agua. Uno de los beneficios generados por lo anterior es la reducción de las pérdidas de nutrientes. Cabe destacar que el nivel de biodiversidad de un ecosistema como el descrito difiere considerablemente de la diversidad natural y de las especies originales que lo constituyen. La inclusión de leguminosas en el sistema productivo permite la fijación biológica del nitrógeno. Asimismo, la integración de la producción animal, manejada con pastoreo directo, favorece el reciclaje de nutrientes, permite la inclusión de especies fijadoras de nitrógeno atmosférico en la fase ganadera (p.e. alfalfa y tréboles) y acelera el flujo de nutrientes.

Utilización de abonos orgánicos y promoción de la actividad biológica: El aporte de abonos orgánicos contribuye a la reposición de nutrientes, a asegurar una buena actividad biológica, a mantener o aumentar el contenido de materia orgánica del suelo y mejorar las propiedades físicas del mismo. Cuando se adicionan abonos orgánicos se pretende lograr que la disponibilidad de los nutrientes móviles coincida con la absorción de los mismos por los cultivos (de cosecha, cobertura o abonos verdes) con el fin de reducir las pérdidas. Dentro de la promoción de la actividad biológica podemos mencionar el grupo de microorganismos relacionados con el ciclo de nitrógeno (rizobiáceas, cianobacterias), los vinculados a fósforo (micorrizas, bacterias solubilizadoras) y aquellos productores de sustancias estimulantes del crecimiento (*Azospirillum*).

Prácticas de conservación del suelo y del agua: En el marco de la producción sustentable debe considerarse la protección del suelo frente a la erosión hídrica y eólica. Mantener el suelo cubierto es la clave para evitar estos procesos de degradación. La cobertura permanente se logra mediante la elección de la rotación o los cultivos, con cultivos de cobertura y con prácticas de labranza conservacionista (labranza vertical, reducida o siembra directa). La siembra directa también permite disminuir las pérdidas de agua por evaporación, contribuyendo a un uso más eficiente de la misma. Para sostener una buena calidad física edáfica es importante evitar la compactación derivada del tránsito agrícola y el laboreo intensivo. Las prácticas de control de tránsito, disminución de las labranzas, altos aportes de materia orgánica y el uso de cultivos que tengan la capacidad de bioperforación por sus raíces, tienden a mantener una buena calidad física del suelo. En planteos donde se utiliza riego, debe monitorearse la calidad del agua incorporada, tendiendo a evitar la degradación del suelo (salinización y sodificación) por usos de agua de mala calidad. Finalmente, la escala de producción condiciona parcialmente las prácticas agronómicas a aplicar para el manejo de la fertilidad. En el caso de cultivos extensivos la inclusión de la ganadería permite reponer, durante la fase ganadera, parte del nitrógeno exportado en la fase agrícola por el uso de leguminosas como pasturas. Sin embargo, es necesario recurrir

a la aplicación de fertilizantes naturales para mantener la fertilidad del suelo. Si el ganado recibe alimentos externos deben considerarse como un ingreso de nutrientes al sistema.

En sistemas productivos de gran extensión no es posible sostener la fertilidad sobre la base de la adición de enmiendas orgánicas debido a los elevados volúmenes que se deberían disponer (SAGPYA, 2010). En cambio, en planteos hortícolas es factible basar el manejo de nutrientes en la aplicación de enmiendas orgánicas, complementando con fijación biológica de nitrógeno. En estos planteos la cría de aves, porcinos o cabras, entre otros, puede ser la base para generar las enmiendas orgánicas utilizadas en los cultivos.

En la Tabla 2 se presentan opciones de manejo generales para cumplir con las estrategias que permiten mantener la calidad del suelo (adaptado de Altieri, 1994). Cabe destacar que las mismas son utilizadas en forma independiente del tipo de producción orgánica o convencional.

Tabla 2. Prácticas agronómicas para sostener la calidad del suelo.

ESTRATEGIA	PRÁCTICAS O ACCIONES
Mejorar la estructura del suelo	Cultivos de cobertura, "mulching", labranza conservacionista
Elevar el contenido de MO	Aplicación de estiércol, desechos orgánicos, abonos verdes y labranza conservacionista
Reducir la compactación	Labranza mínima y uso de cultivos perforadores
Mejorar reciclaje de nutrientes	Aplicación de materia orgánica, sistemas agroforestales, cultivos múltiples, integración animal, sincronía entre liberación del nutriente y consumo por los cultivos, activación biológica del suelo
Manejar la acidez del suelo	Uso de variedades tolerantes, aplicación de cal, adición de MO y enmiendas naturales
Manejar la salinidad y alcalinidad	Riegos especiales para mejorar la lixiviación de sales, aplicación de enmiendas, uso de cultivos apropiados.

Los fertilizantes y la producción de alimentos

A nivel mundial se estima que la contribución de los fertilizantes al rendimiento de los cultivos es del 50% (Erisman *et al.*, 2008). En el caso de fertilizantes nitrogenados es importante mencionar que la aplicación tiene riesgos potenciales. Estos riesgos están asociados a la baja eficiencia de utilización del nitrógeno del fertilizante y consecuente contaminación por lixiviación, emisión de óxido nitroso, o simplemente un uso ineficiente de la energía consumida en el proceso de producción del fertilizante.

En los últimos años en Argentina se produjo un gran aumento de la producción de granos. Son dos los factores que determinaron el crecimiento en la producción de alimentos del país, por un lado el aumento de la superficie cultivada y por otro el incremento del rendimiento de los cultivos. Entre los factores que propiciaron este aumento de rendimiento está el incremento del uso de fertilizantes, principalmente de nitrógeno y fósforo. Este aporte de nutrientes permitió aumentar los rendimientos, especialmente de cereales como trigo y maíz. Sin embargo, la contribución de los fertilizantes al rendimiento en la Argentina es mucho menor que a nivel mundial. Ello se debe a las menores dosis aplicadas, a la dominancia del cultivo de soja que fija nitrógeno atmosférico y es escasamente fertilizado, así como a las reservas naturales de nutrientes de nuestros suelos.

El balance de un nutriente se calcula en partir de las entradas y salidas al sistema suelo-planta en un período determinado de tiempo. En forma simplificada se toman las entradas como los aportes por fertilizantes, fijación biológica y abonos, mientras que la salida se estima a partir de la exportación del nutriente en el producto cosechado. Los balances en Argentina, han sido históricamente negativos. Si bien mejoraron en el último tiempo siguen, siendo negativos ya que nos llevamos más nutrientes de los que agregamos. Estos balances llevaron a que los suelos pampeanos hayan sufrido pérdida de nutrientes o sea de fertilidad. En las producciones orgánicas estos balances deben ser positivos o neutros.

Bibliografía

- ALTIERI MA. 1994. Bases agroecológicas para una producción agrícola sustentable. *Agricultura Técnica (Chile)* 54: 371-386.
- ÁLVAREZ C, M BARRACO, M PEREZ, L PEREZ, C SCIANCA, M BUFFARINI, P DAVIES, R HERNANDEZ. 2009. Sistema intensivo de producción de alimentos ecológicos, estación experimental agropecuaria INTA General Villegas. En: JA ULLE (Coord.) Proyecto regional Desarrollo y difusión de tecnología para la producción ecológica. Informe Técnico 2009 del centro regional Buenos Aires norte. pp: 155-158.
- BARRACO M, C ÁLVAREZ, M DIAZ ZORITA. 2004. Ensayo de labranzas de larga duración en un Hapludol del Noroeste bonaerense: efectos en el suelo y los rendimientos de maíz y soja. *Publicación Técnica N° 40*. EEA INTA Villegas: 1-17.
- BERTIN O, OB ROSSI, O BAZZIGALUPI, R GARCIA, J TORCHELLI. 2009. Módulo de prueba de producción orgánica de cereales, oleaginosas y pasturas. En: J. A. ULLE (Coord.) Proyecto regional Desarrollo y difusión de tecnología para la producción ecológica. Informe Técnico 2009 del Centro Regional Buenos Aires Norte. pp: 238-239.
- BOARI R, N CHUARD, V FERNANDEZ, P POUILLER. 2014. Producción orgánica en Argentina y en el mundo. http://www.minagri.gob.ar/site/ganaderia/bovinos/02-Informacionsectorial/02=Informes/_archivos/000005=Producci%C3%B3norg%C3%A1nica/000005-Producci%C3%B3norg%C3%A1nica2014.pdf
- DIRECCIÓN INFORMACIÓN AGROPECUARIA Y FORESTAL. 2016. <http://www.siiia.gob.ar/>. Ingreso 03/06/2016.
- ERISMAN JW, MA SUTTON, J GALLOWAY, Z KLIMONT, W WINIWARTER. 2008. How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature*: 636-639.
- IICA. 2010. Legislación. <http://www.iica.int/Esp/regiones/sur/argentina/DocumentosdelaOficina/estado-produccion-organica-en-Argentina.pdf>. Ingreso 15/10/2010.
- KIRCHMANN H, L BERGSTRÖM, T KATTERER, O ANDREN, R ANDERSSON. 2008. Chapter 3. Can organic crop production feed the world? In: H KIRCHMANN, L BERGSTRÖM (Eds.). *Organic Crop Production-Ambitions and Limitations*. pp: 39-72.
- SAGPYA. 2010. http://www.sagpya.mecon.gov.ar/new/0-0/prensa/publicaciones/prod_organica/produccion.pdf. Ingreso 13/10/2010.
- SENASA. 2007. Situación de la Producción Orgánica en la Argentina durante el año 2007. <http://organicsa.net/organicsa/produccionorganicaargentina2007.pdf>. Ingreso 14/04/2011.
- SENASA. 2008. Situación de la Producción Orgánica en la Argentina durante el año 2008. <http://www.oia.com.ar/estadistica-senasa/EstadisticasOrganicosSENASA.pdf>. Ingreso 14/04/2011.

- SENASA. 2009. Situación de la Producción Orgánica en la Argentina durante el año 2009. <https://viejaweb.senasa.gov.ar/Archivos/File/File3277-informe-estadistico-2009.pdf> Ingreso 11/02/2016.
- SENASA. 2010a. Ley 25127. <http://www.senasa.gov.ar/contenido.php?to=n&in=981&io=4659>. Ingreso 15/10/2010.
- SENASA. 2010b. Decreto 97/2001, reglamentación de la ley 25127. <http://www.senasa.gov.ar/contenido.php?to=n&in=1142&io=5926>. Ingreso 15/10/2010.
- SENASA. 2011. Situación de la Producción Orgánica en la Argentina durante el año 2010. http://www.alimentosargentinos.gob.ar/contenido/valorAr/organicos/senasa/ORGANICOS_SENASA_2010.pdf. Ingreso 03/06/2016.
- SENASA. 2012. Situación de la Producción Orgánica en la Argentina durante el año 2012. http://www.alimentosargentinos.gob.ar/contenido/valorAr/organicos/senasa/ORGANICOS_SENASA_2011.pdf. Ingreso 03/06/2016.
- SENASA. 2013. Situación de la Producción Orgánica en la Argentina durante el año 2012. <http://www.oia.com.ar/documentos/informeproduccionorganica2012.pdf>. Ingreso 03/06/2016.
- SENASA. 2014. Situación de la Producción Orgánica en la Argentina durante el año 2013. http://www.alimentosargentinos.gob.ar/contenido/valorAr/organicos/senasa/ORGANICOS_SENASA_2013.pdf. Ingreso 03/06/2016.
- SENASA. 2015. Situación de la Producción Orgánica en la Argentina durante el año 2014. [http://www.senasa.gov.ar/prensa/DNICA/Dir.Nac_calidad_agroalimentaria/Coordinacion_Productos_Ecologicos/Situacion_de_la-PO-en_la_Argentina_2014-\(Info.estadistico_2014\).pdf](http://www.senasa.gov.ar/prensa/DNICA/Dir.Nac_calidad_agroalimentaria/Coordinacion_Productos_Ecologicos/Situacion_de_la-PO-en_la_Argentina_2014-(Info.estadistico_2014).pdf). Ingreso 03/06/2016.
- SEUFERT V, N RAMAKUTTY, JA FOLEY. 2012. Comparing the yields of organic and conventional agriculture. *Nature* 485: 229-232.
- STEWART WM, DW DIBB, AE JOHNSTON, J SMYTH. 2005. The contribution of commercial fertilizer nutrients to food production. *Agronomy Journal* 97: 1-6.

LIMITANTES DE LA CAPACIDAD PRODUCTIVA DEL SUELO

Helena Rimski-Korsakov y Carina R. Álvarez

En el suelo coexisten una serie de factores que afectan al crecimiento vegetal. La disponibilidad de nutrientes es uno de ellos. Hay situaciones donde dicha disponibilidad se ve afectada por otros factores que alteran a la producción, antes que los nutrientes. Un ejemplo de ello, no relacionado con el suelo son las precipitaciones. En situaciones de estrés hídrico para los cultivos, el rendimiento de los mismos se limitará primero por la falta de agua, pudiendo estar los nutrientes en el suelo en cantidades adecuadas. Existen otros ejemplos de dichas interacciones directamente vinculados con el suelo. Estos factores son: hidromorfismo, acidez, sodicidad, salinidad y propiedades físicas edáficas. Estas problemáticas deben ser evaluadas antes de tomar alguna decisión relacionada con el contenido de nutrientes (Figura 1). En general dichos problemas, a diferencia del nivel de los nutrientes, son de difícil a imposible corrección.

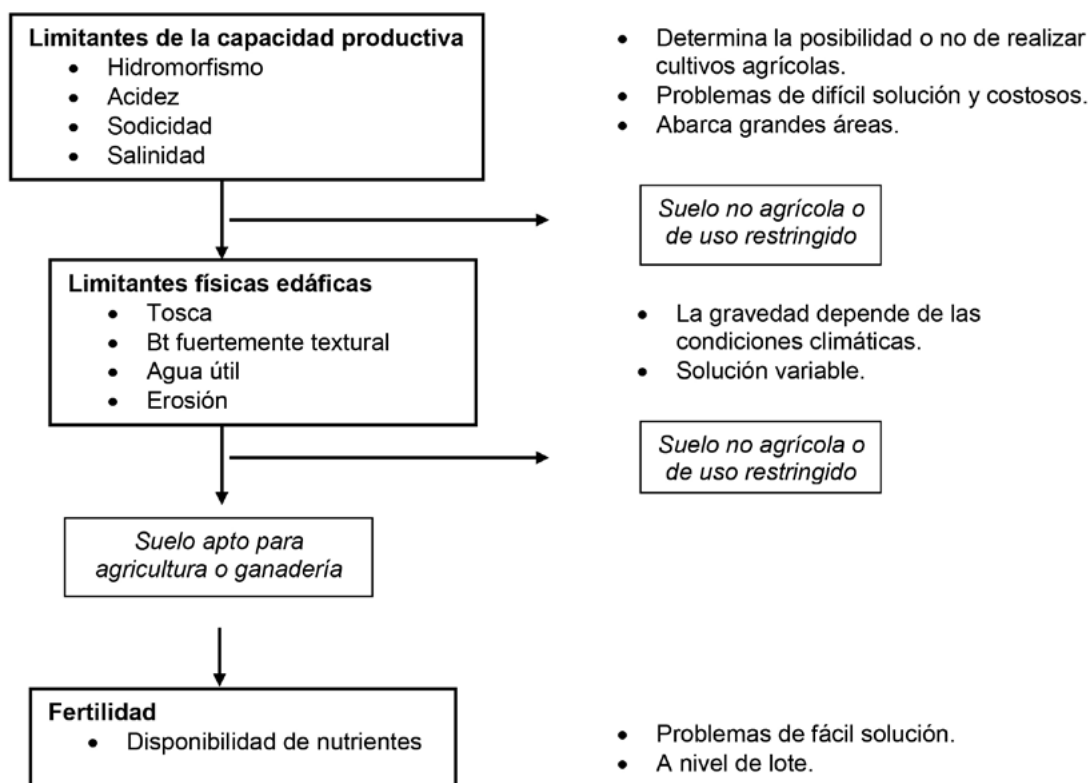


Figura 1. Secuencia de diagnóstico (adaptado de Taboada y Álvarez, 2008).

Suelos hidromórficos

Un suelo hidromórfico es aquel que se encuentra temporal o permanentemente saturado con agua. La tasa de difusión de oxígeno en el agua es mucho menor que en el aire, por lo que en general se presentan situaciones de déficit de oxígeno. Este estado de saturación hídrica conlleva a situaciones reductoras en el suelo.

Como la mayoría de las limitantes de la capacidad productiva, el origen del hidromorfismo en los suelos puede ser genético o haber sido generado o potenciado por acción del hombre. En el primero de los casos, origen genético, estas situaciones se reconocen en zonas de relieve deprimido combinado con un drenaje deficiente. En estas zonas, además de las precipitaciones recibidas directamente, se recibe agua de posiciones topográficamente superiores e inclusive de ascensos capilares de las napas freáticas.

Indirectamente el hombre puede generar situaciones de hidromorfismo al regar con aguas de mala calidad, que contengan altos contenidos de sodio. Al sodificarse el suelo aparecen los problemas relacionados con la pérdida de estructura de los suelos e impedimento de drenaje que serán discutidos en la sección de suelos sódicos.

Los suelos con hidromorfismo tienen una serie de rasgos por los que se los pueden identificar. Estos rasgos van desde los más obvios, como ser la presencia de agua en superficie y olores desagradables, hasta otros más sutiles como la presencia de moteados y concreciones y colores característicos en el perfil. Los moteados y concreciones de hierro y manganeso son típicos signos de drenaje impedido en los suelos. Son el resultado de la solubilización y precipitación alternada en períodos de anegamiento y posterior secado. Se distinguen como nódulos endurecidos de colores rojizos o pardos. Es importante destacar que la profundidad a la que se hallan dichos rasgos determina a partir de la cual las raíces se van a ver comprometidas. Por otro lado, los colores característicos de este tipo de suelos son los pardos, grisáceos a verdosos.

Cuando en los suelos hidromórficos el aire presente en los poros del suelo es reemplazado por agua, se genera deficiencia de oxígeno. La velocidad de difusión del O_2 es 10^5 más lenta en agua que en el aire. Consecuentemente se restringe la respiración radical y de los microorganismos, afectándose todos los procesos metabólicos. Cada especie vegetal tiene una diferente respuesta a la falta de oxígeno. Existen plantas tolerantes como el arroz y otras muy sensibles como el tabaco. Cuando menos del 10% del espacio poroso se encuentra lleno de aire la mayoría de los cultivos ven afectados sus crecimientos.

Las plantas afectadas por restricción de oxígeno presentan raíces más cortas y gruesas. Por otro lado, la nodulación de las especies leguminosas se ve afectada presentando nódulos más pequeños.

En la región pampeana se encuentran situaciones generalizadas de hidromorfismo en la Pampa Deprimida, el Delta, las Lagunas Encadenadas y el Oeste bonaerense. También se encuentran sitios puntuales de posiciones topográficas de bajos en las subregiones pampeanas (Figura 2).

El problema del hidromorfismo es de muy difícil solución. Se requieren obras de drenajes que evacuen el agua fuera de las situaciones comprometidas (Figura 3). Esto requiere de muy elevadas inversiones y estudios detallados para no perjudicar a las zonas de descarga de agua con el problema inicial. Estos son los motivos por los que se aconseja convivir con el problema y hacer un uso del suelo con especies adaptadas a condiciones de bajo oxígeno. Ejemplos de especies que crecen en suelos hidromórficos son el arroz, el sauce y el álamo. Una posibilidad es destinar estos suelos a uso ganadero. En tal sentido,

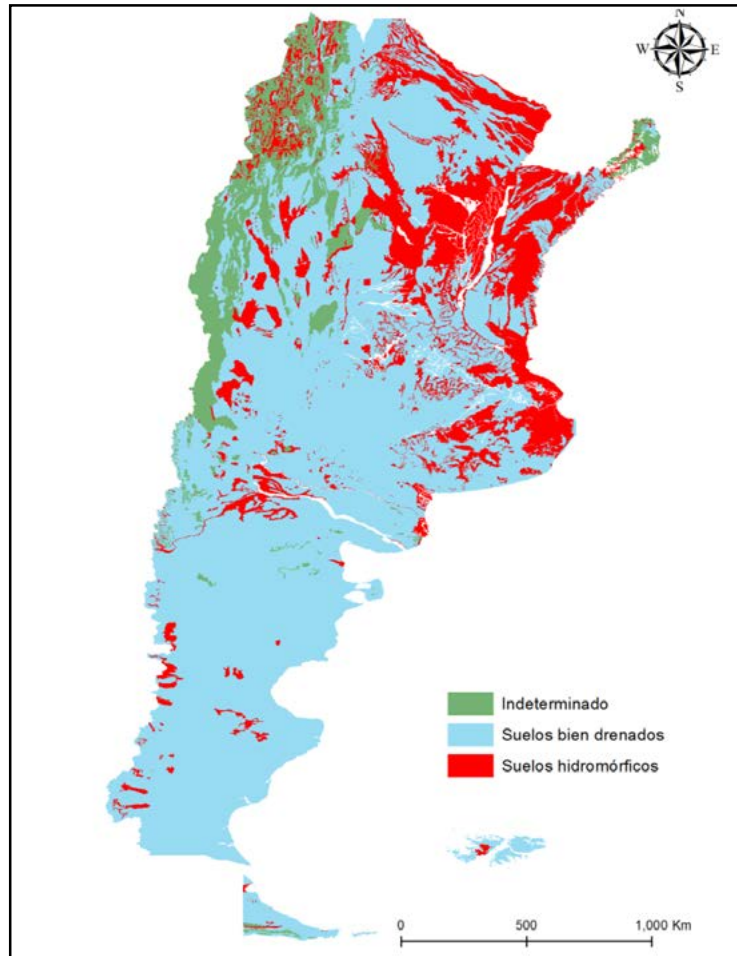


Figura 2. Mapa de suelos hidromórficos de la República Argentina (Tomado de Vázquez *et al.*, 2014).



Figura 3. Canales para evacuar el agua hacia cubetas de almacenaje (Tomado de Damiano, 2014).

en la Pampa Deprimida existen pastizales naturales con especies adaptadas a esta limitante y con valor forrajero. También hay especies de forrajeras que se pueden implantar como agropiro, festuca, lotus y melilotus que se producen bien en estas condiciones.

Suelos ácidos

Los suelos ácidos son aquellos que contienen un pH de valor inferior a 5,5. O sea, que tienen una alta concentración o actividad de hidrógeno.

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$$

El principal origen de la acidez de los suelos es la pérdida de bases del complejo de intercambio. Esta pérdida de bases puede originarse naturalmente en situaciones de balances hídricos positivos que las hayan lixiviado. El hombre también puede generar pérdida de dichas bases por la extracción por los cultivos y posterior exportación de los mismos. Los sitios liberados por las bases lixiviadas o extraídas del complejo de cambio son reemplazados por H^+ .

La degradación de la materia orgánica también es un proceso natural que libera protones al medio. Sin embargo, dicho proceso no genera efectos acidificantes significativos en condiciones naturales de zonas templadas. Por el contrario, ante disturbios antrópicos la mineralización de la materia orgánica se potencia y pasa a ser una de las causas de acidificación no natural.

Los residuos vegetales de algunas especies, autóctonas o introducidas, promueven a la acidificación de los suelos, como ser el caso de las coníferas de clima frío y templado-frío.

Los fertilizantes también son fuentes de liberación de H^+ . Los fertilizantes amoniaca-les reaccionan en el suelo y en el proceso de nitrificación (formación de nitratos, NO_3^-) se liberan protones. La lluvia ácida también puede acidificar los suelos pero se limita a zonas industriales, que en nuestro país no conviven con las agrícolas-ganaderas.

La variable utilizada para caracterizar los suelos ácidos es el pH. Se consideran como ácidos los suelos cuyo pH es menor a 5.5. Sin embargo, cabe destacar que este umbral rígido puede variar de acuerdo a la especie vegetal que se trate. Hay plantas que disminuyen su producción con valores de pH por encima de dicho valor.

La determinación de pH puede realizarse directamente a campo mediante peachímetros portátiles o cintas sensibles. Si se busca más precisión se requiere la toma de muestras y el envío para su análisis en laboratorio. En el laboratorio la muestra de suelo se mezcla con agua. La proporción suelo:agua pueden variar desde 1:1, 1:2.5 a 1:10. La más difundida en nuestros sistemas es la de 1:2.5. Cuando se quieren comparar datos es importante que se conozcan estos valores ya que condicionan el resultado.

Un rasgo característico reconocible a simple vista son los colores rojizos de los suelos ácidos de origen genético. Los suelos del noreste argentino son el típico ejemplo de dichos colores.

El principal efecto nocivo de la acidez sobre los vegetales es la toxicidad del Al^{3+} , el Mn^{2+} y el H^+ . Estos elementos pasan a formas activas tóxicas para los vegetales cuando el pH del suelo está por debajo de 5.5.

El aluminio activo en situaciones ácidas interfiere en la absorción de calcio, magnesio y potasio. También tiende a precipitar, al igual que el hierro, al fósforo y al molibdeno. Lo anterior genera deficiencias nutricionales para los cultivos, afectando sus rendimientos. También pueden generarse deficiencias de nitrógeno por verse afectados los microorganismos relacionados con los procesos de nitrificación y fijación simbiótica. En la Figura 4 se observan las diferentes disponibilidades de nutrientes según el pH del suelo.

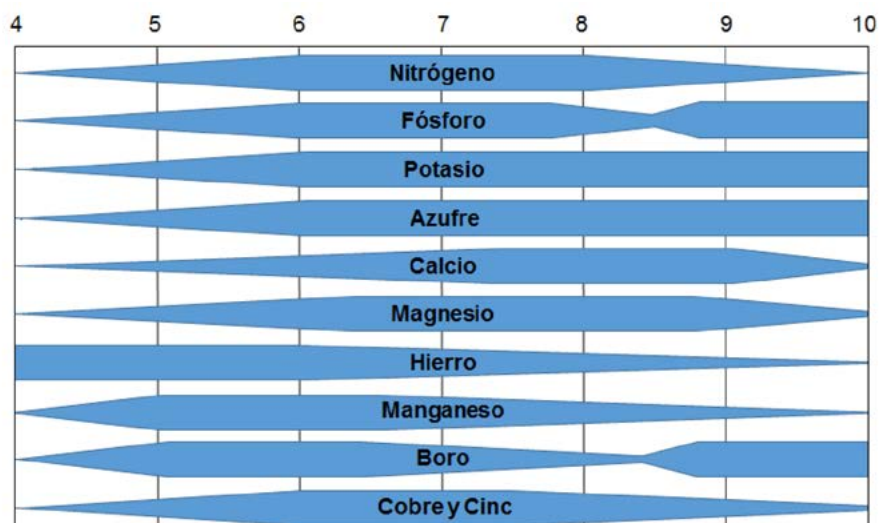


Figura 4. Disponibilidad de nutrientes según el pH del suelo.

En Argentina los suelos ácidos se encuentran principalmente en la provincia de Misiones y el noreste de Corrientes. En estas regiones se generaron por los balances hídricos positivos. En la región pampeana se encuentran suelos levemente ácidos en situaciones puntuales y no extendidas y es consecuencia del manejo.

La conveniencia de corrección de los suelos ácidos debe ser estudiada en términos de factibilidad económica. Una opción es convivir con la acidez utilizando especies que sean menos sensibles a dicho problema. En la Tabla 1 se presentan los pH críticos, a partir de los cuales se detectan problemas para el desarrollo de diferentes especies.

Tabla 1. Valores críticos de pH de varias especies vegetales. Extractado de Adams (1984) y Tisdale *et al.* (1993).

pH crítico	Especie
5.0	Azalea
5.0-5.5	Papa Arándanos Tabaco
5.5	Trigo Maíz Cebada Sorgo Trébol rojo
6.0	Alfalfa Remolacha

Si se opta por corregir la acidez, la práctica más utilizada es la de encalado. Al incorporarse al suelo, el carbonato de calcio se disuelve y posteriormente neutraliza a los cationes causantes de la acidez (Al^{3+} , H^+ , Mn^{2+}).

Los materiales utilizados para corregir la acidez son minerales de origen natural que pueden ser aplicados en producciones orgánicas. Estos materiales son: cal calcítica (carbonato de calcio), cal dolomítica (carbonato de calcio y magnesio), conchilla molida, entre otros. La calidad o eficiencia de corrección de los distintos materiales depende del valor de neutralización, expresado en equivalente de carbonato de calcio, y del tamaño de partícula,

que afecta la reactividad. En la Tabla 2 se muestra la reactividad de las enmiendas según el tamaño de partícula.

Para determinar la dosis a aplicar pueden realizarse ensayos a campo agregando dosis creciente de calcáreo y posteriormente midiendo las variaciones del pH edáfico. El mismo principio puede usarse en incubaciones realizadas en laboratorio.

Tabla 2. Reactividad del material según tamaño de partícula (Álvarez y Rubio, 2010).

Tamaño de partícula	Reactividad
1 mm	0 muy lenta
0,8 mm	75%
0,4 mm	90%
0,3 mm	100%
0,15 mm	125%

En la Figura 5 se presenta la respuesta de la alfalfa a la variación del pH edáfico en la región pampeana y en la Figura 6 la cantidad de enmienda a agregar para producir la variación deseada de pH.

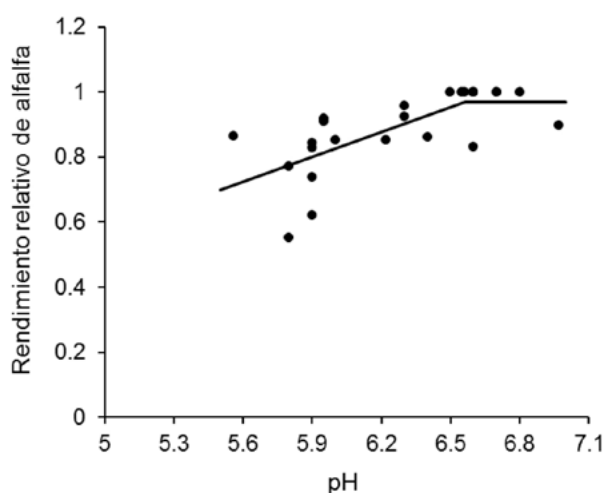


Figura 5. Rendimiento relativo de alfalfa según el pH de suelo (adaptado de Álvarez y Rubio, 2010).

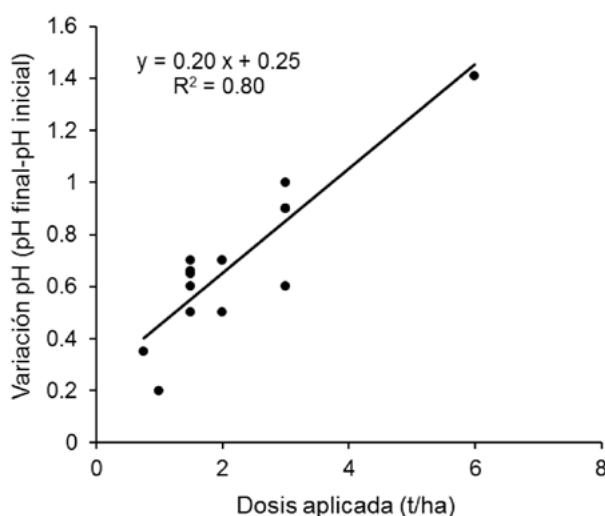


Figura 6. Relación entre la variación del pH del suelo y la dosis aplicada de diferentes enmiendas (cal calcítica, cal dolomítica, cochilla, calcítica micronizada), en la región pampeana (adaptado de Álvarez y Rubio, 2010).

Suelos sódicos

Los suelos sódicos se caracterizan por tener una alta cantidad de sodio intercambiable y un bajo nivel de sales en solución.

El sodio en el suelo puede haber ingresado en el perfil de forma natural. Las napas freáticas pueden tener un alto contenido de sodio. Esta agua enriquecida en sodio puede ascender en el perfil por capilaridad. En situaciones donde la napa se encuentra cercana a la superficie, el sodio puede llegar a profundidades donde afecta al crecimiento radical.

A su vez, la actividad antrópica pudo haber ingresado el sodio en el perfil al realizar riegos con aguas de mala calidad y altos contenidos de dicho elemento.

Para determinar la calidad del agua de riego existen tablas de referencia que de acuerdo a una serie de parámetros la clasifican según su aptitud. Un ejemplo de estas tablas es la propuesta por Ayers y Westcot (1985) para la FAO (Tabla 3).

Tabla 3. Clasificación de la calidad del agua para riego según la FAO (Adaptado de Ayers y Westcot, 1985). CE: Conductividad eléctrica (en mS/cm ó dS/m).

Problema Potencial	Grado de restricción en el uso		
	Ninguno	Ligero o moderado	Severo
<i>Salinidad</i>			
CE (dS/m)	<0.7	0.7-3.0	>3.0
<i>Infiltración</i>			
RAS = 0-3	CE >0.7	CE 0.7-0.2	CE <0.2
RAS = 3-6	CE >1.2	CE 1.2-0.3	CE <0.3
RAS = 6-12	CE >1.9	CE 1.9-0.5	CE <0.5
RAS = 12-20	CE >2.9	CE 2.9-1.3	CE <1.3
RAS = 20-40	CE >5.0	CE 5.0-2.9	CE <2.9

Los suelos sódicos presentan rasgos característicos en su perfil distinguibles a simple vista. Entre ellos se distinguen la presencia de moteados y concreciones (característicos de situaciones de hidromorfismo), la estructura masiva y la estructura columnar en el horizonte Bt. Es importante destacar que la profundidad a la que se hallan dichos rasgos determina a partir de la cual las raíces se van a ver comprometidas.

Para clasificarlos analíticamente se recurre a una serie de parámetros (pH, PSI, CE y RAS). El pH superior a 8.5 da indicios de sodicidad. La misma debe ser confirmada por el PSI (Porcentaje de Sodio Intercambiable) y/o la RAS (Relación Adsorción Sodio). La conductividad eléctrica se determina para descartar la presencia de sales. Si dicho valor supera los 4 dS/m se trata de suelos salino-sódicos, que se detallarán más adelante por su problemática diferente.

El PSI se define como la cantidad de sodio adsorbido por las partículas del suelo, expresado en porcentaje de la CIC (Capacidad de Intercambio Catiónico). Los suelos sódicos están definidos como aquellos donde el PSI es mayor a 15. Sin embargo, valores menores, en algunas situaciones, ya pueden presentar las problemáticas de dicho tipo de suelo. Por lo tanto, debe confirmarse dicho valor con la presencia de algún síntoma visual.

$$\text{PSI (\%)} = \text{Na intercambiable (meq/100g de suelo)} * 100 / \text{CIC (meq/100g de suelo)}$$

Un ejemplo de cálculo se va a realizar utilizando la descripción del perfil de un suelo mostrado en la Tabla 4. Este suelo se encuentra en medias lomas y planos bajos de la Cuenca del Salado y es imperfectamente drenado. El horizonte B21t presenta estructura columnar y a partir de este horizonte aparecen moteados comunes de hierro y manganeso.

Tabla 4. Descripción analítica del perfil.

Horizonte	A1	B21t	B22t	B3
Prof. Horizonte (cm)	0-20	20-50	50-70	70-130
Carbono orgánico (%)	1.95	0.62	0.25	0.15
Nitrógeno total (%)	0.19	0.08	0.04	-
Arcilla (%)	29.10	58.90	46.30	35.6
Limo (%)	64.30	37.30	48.10	57.1
Arena (%)	6.60	3.80	5.60	7.30
Humedad equivalente (%)	32.30	85.60	64.60	54.40
pH	7.8	8.7	8.5	8.3
Cationes de cambio (meq /100g)				
Ca ⁺⁺	9.10	10.10	9.50	8.5
Mg ⁺⁺	4.70	5.20	4.20	5.2
Na ⁺	0.60	14.40	9.20	3.9
K ⁺	2.30	4.30	4.30	3.5
CIC (cmolc kg)	19.90	37.50	31.80	26.1

El PSI del horizonte A1 se calcula:

$$\text{PSI} = 0.60 * 100 / 19.90 = 3.01\%$$

El PSI es de 38.4%, 28.9% y 14.9% para los horizontes B21t, B22t y B3, respectivamente. Esto mostraría que la sodicidad aparece a los 20 cm de profundidad.

Actualmente muchos laboratorios utilizan la RAS como indicador de la sodicidad del suelo. Esta medición no se puede hacer utilizando los valores de la carta de suelos ya que las concentraciones de Na, Ca y Mg se refieren a las existentes en el extracto de saturación del suelo. Por lo tanto, el laboratorio informa directamente el valor de la RAS y no la concentración de iones. Valores de RAS mayores a 13 están indicando la presencia de problemas de sodicidad.

$$\text{RAS} = \text{Na} / \sqrt{(\text{Ca} + \text{Mg}) / 2}$$

En los suelos sódicos el rendimiento de los cultivos se ve limitado principalmente por problemas en las condiciones físicas edáficas. Estos problemas se originan porque los iones de sodio interfieren en las fuerzas que unen a las partículas de arcilla, separándolas o en términos edáficos: dispersándolas. El sistema poroso se ve afectado incrementándose la proporción de microporos. Por otro lado, las partículas de arcilla dispersas se mueven por la estructura del suelo bloqueando sus poros. Todo lo anterior trae inconvenientes en la movilidad del agua en el suelo. Tanto la infiltración (ingreso del agua en el perfil) como la conductividad hidráulica (movimiento del agua dentro del perfil) se encuentran disminuidas. En la Figura 7 se muestra el efecto del PSI sobre la conductividad hidráulica. Esos son los motivos por los que se generan anegamientos e inundaciones en estos suelos.

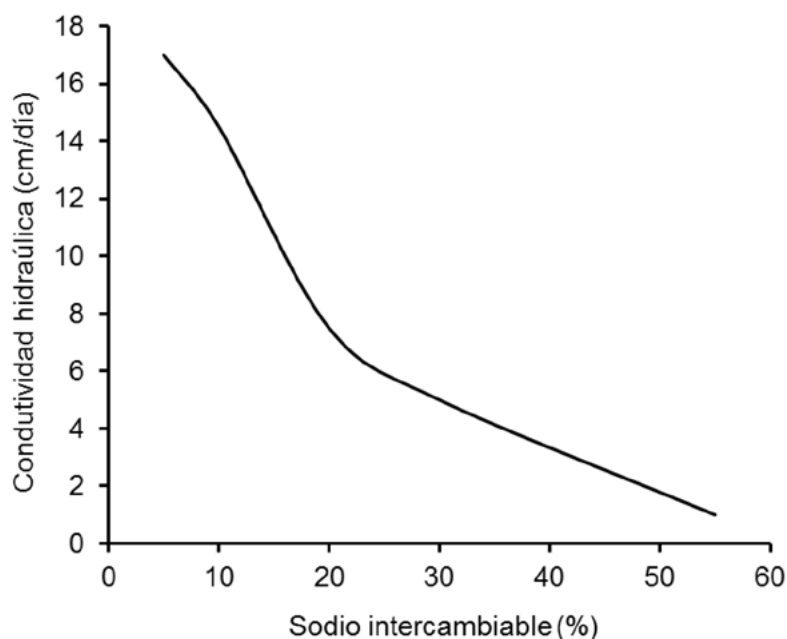


Figura 7. Relación entre porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y la conductividad hidráulica (adaptado de Emerson, 1984).

Otro efecto nocivo de este tipo de suelos es la presencia de costras superficiales. Cuando se humedecen los suelos sódicos tienden a hincharse y cuando se secan se endurecen y se desarrolla una costra dura y agrietada en su superficie. Estas costras reducen la emergencia de plántulas.

También el sodio del suelo puede tener un efecto directo sobre la planta al interferir en el metabolismo celular y la disponibilidad de otros nutrientes.

Los suelos sódicos se encuentran difundidos en gran parte de la región pampeana, relacionado con situaciones topográficas bajas (Figura 8). El mapa de sodicidad es muy coincidente con el de la problemática de hidromorfismo.

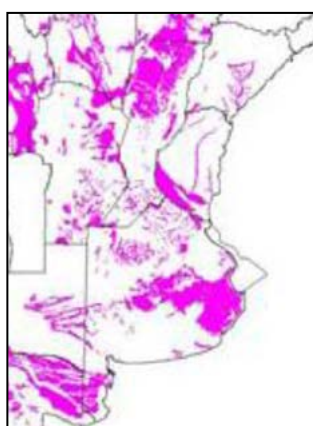


Figura 8. Suelos con sodicidad como limitante (Tomado de Gómez y Cuzate, 2007).

El aprovechamiento de los suelos sódicos puede no requerir ninguna inversión para ponerlos en producción, como ser el uso de especies adaptadas como fuente de alimento de animales de bajos requerimientos. Si se opta por la realización de alguna inversión para su puesta en producción debe tenerse en cuenta un detallado análisis económico para la evaluación de su conveniencia. Por otro lado, debe tenerse en cuenta que la perdurabilidad

de la práctica utilizada depende de evitar el reingreso del sodio en el sistema. Por lo tanto, una vez realizada la práctica de corrección debe tratar de reducir el ascenso capilar desde la napa enriquecida en sodio (drenaje) o el uso de aguas de riego de mala calidad.

La corrección de suelos sódicos requiere la utilización de alguna enmienda para reemplazar el sodio del complejo de cambio por calcio. La enmienda más utilizada para este propósito es el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Tiene bajo costo, está muy difundida su disponibilidad y está permitida en producciones orgánicas. Las dosis utilizadas son del orden de toneladas por hectárea. Por lo tanto, el costo del flete cobra gran importancia en la evaluación económica de la práctica.

El efecto del yeso actúa en dos etapas. Primero, por tratarse de una sal, el yeso incrementa la concentración electrolítica. Esto flocula al suelo y mejora la conductividad hidráulica. A medida que el agua se moviliza por el perfil se produce el intercambio del Na^+ por el Ca^{2+} . Para que la práctica tenga más perdurabilidad el Na^+ desplazado debe salir del sistema y esto habitualmente implica una obra de drenaje con el fin de aumentar la profundidad hasta la napa.

Existen modelos para estimar la dosis de yeso a utilizar. Si no se cuenta con ningún modelo adaptado para el área en estudio se puede estimar la dosis de acuerdo con los meq de sodio que se desea reemplazar por calcio (Tabla 5). La eficiencia del yeso en general es baja, en el orden del 20 al 30%.

Tabla 5. Cantidad de yeso (kg yeso/ha) a agregar para llevar a $\text{PSI} = 5$ a partir de diferentes PSI iniciales y diferentes CIC (meq/100g). Se consideró la corrección de los primeros 15 cm del suelo, con una densidad aparente de 1.3 t/m^3 y una eficiencia del 30%.

PSI \ CIC	10	15	20	25	30
10.0	3	4	6	7	8
12.5	4	6	8	10	13
15.0	6	8	11	14	17
17.5	7	10	14	17	21
20.0	8	13	17	21	25
22.5	10	15	20	24	29
25.0	11	17	22	28	34
27.5	13	19	25	31	38
30.0	14	21	28	35	42

Suelos salinos

Los suelos salinos se caracterizan por poseer un elevado nivel de sales en solución (principalmente de cloruros y sulfatos) en su perfil.

Las sales presentes en el perfil son características en zonas áridas. En estas situaciones las precipitaciones no llegaron a lavar las sales originales. En zonas húmedas el origen puede deberse a ingresos de sales desde la napa freática. El ascenso capilar desde la napa freática alcanzará profundidades más cercanas a la superficie cuanto más fina sea la textura del suelo. En suelos arenosos el ascenso será de pocos centímetros mientras que en los arcillosos puede ser de más de un metro.

Por otro lado, el hombre puede introducir sales a través del agua de riego. Si dicha agua es de mala calidad el uso reiterado de la misma tenderá a salinizar el suelo. Al igual que lo que se mencionó anteriormente cuando se discutió la participación del uso de agua de mala calidad en el proceso de sodificación de los suelos, debe determinarse la calidad del agua antes de su uso para conocer las consecuencias del mismo (Tabla 3). Hay veces que se utiliza una lámina de agua de riego superior a la necesaria para generar un arrastre de las sales por debajo de la profundidad de exploración radical.

El uso de algunos fertilizantes y abonos puede aumentar la conductividad eléctrica el suelo. Especialmente eso ocurre con los fertilizantes potásicos.

Es común en los suelos salinos poder ver directamente las sales en superficie. El parámetro para caracterizar a los suelos salinos es la conductividad eléctrica (CE). El valor umbral para considerar a un suelo como salino es una CE mayor a 4 dS/m. A la vez, dicho valor debe ser acompañado por el de pH y PSI para diferenciarlos de los suelos salino-sódicos que serán mencionados posteriormente. O sea, los suelos salinos deben poseer pH menor a 8.5 y PSI menor a 15.

El principal efecto generado por las sales es el de estrés hídrico para los cultivos. Las sales generan un potencial osmótico alto de la solución del suelo, por lo que la planta tiene que utilizar más energía para absorber el agua. O sea, aunque exista agua en el perfil, la misma no está disponible para las plantas. El aumento en el contenido salino genera menores tasas de germinación, emergencia y crecimiento, pudiendo alcanzar la muerte en situaciones extremas.

La salinidad puede generar deficiencias nutricionales por desbalance entre los nutrientes. El exceso de un ión limita la absorción de otros iones. Por ejemplo, el exceso de cloruro reduce la absorción del nitrato.

Como se dijo anteriormente, los bajos niveles pluviométricos hacen que no se laven las sales originales de los suelos, por lo tanto esta problemática se encuentra difundida en zonas áridas.

Por otro lado, se encuentra en zonas de riego donde el agua es de calidad deficiente. Esto no se da distribuido en ninguna zona, sino que son sitios puntuales donde conviven el riego y el agua de mala calidad.

También este tipo de suelo se encuentra en situaciones bajas cercanas a napas de altos contenidos de sales no sódicas.

La corrección de la salinidad es sumamente compleja ya que habría que lavar las sales presentes en el perfil. Cuando las escasas lluvias son el origen de las mismas, difícilmente se pueden lavar por medios naturales. El uso de riego para su lavado podría ser apto, solo si el agua utilizada es de buena calidad, en caso contrario acentuaría el problema.

Por otro lado, debe evitarse usar aguas de mala calidad, no para corregir, sino para no generar el problema. Si se realizan riegos deben utilizarse láminas de lavado que impidan la acumulación de sales dentro de la profundidad de exploración radical.

Una opción de manejo es el uso de especies adaptadas a altos contenidos de sales. En la Tabla 6 se muestra la susceptibilidad de diferentes especies al contenido de sales en el suelo (Ayers y Westcot, 1985).

Tabla 6. Pérdida de rendimiento según la conductividad eléctrica en el estrato superior del suelo (CE). El 0% representa el valor a partir del cual mayores CE disminuyen el rendimiento (Adaptado de Ayers y Westcot, 1985).

Pérdida de rendimiento	0%	10%	25%	50%
	CE	CE	CE	CE
Cebada	8,0	10	13	18
Algodón	7,5	9,6	13	17
Sorgo	6,8	7,4	8,4	9,9
Trigo	6,0	4,0	4,9	13
Soja	5,0	5,5	6,3	7,5
Arroz	3,0	3,8	5,1	7,2
Maíz	1,7	2,5	3,8	5,9
Tomate	2,5	3,5	5,0	7,6,
Papa	1,7	2,5	3,8	5,9
Agropiro	7,5	9,9	13	19
Rye grass	5,6	6,9	8,9	12
Lotus	5,0	6,0	7,5	10
Festuca	3,9	5,5	7,8	12
Alfalfa	2,0	3,4	5,4	8,8
Trebol rojo	1,5	2,3	3,6	5,7
Pomelo	1,8	2,4	3,4	4,9
Naranja	1,7	2,3	3,3	4,8
Durazno	1,7	2,2	2,9	4,1
Uva	1,5	2,5	4,1	6,7

Suelos salinos-sódicos

Los suelos salino-sódicos contienen conjuntamente altas cantidades de sodio intercambiable y sales solubles

Este tipo de suelos tienen similares orígenes que los suelos sódicos mencionados anteriormente. De hecho, muchas veces se encuentran asociados con aquellos. El origen natural es el ascenso de napas enriquecidas en sodio en situaciones de bajos. Y el hombre, al igual que en los suelos salinos y los sódicos, puede haber ingresado las sales y el sodio por uso de agua de riego de calidad deficiente.

Es común ver las sales a simple vista en superficie. En los suelos salino-sódicos el PSI es mayor a 15, la conductividad eléctrica es mayor que 4 dS/m y el pH del suelo mayor a 8.5.

Las sales y el sodio actúan en forma opuesta en la estructura del suelo. El sodio lo dispersa y las sales lo floculan, mejorando las propiedades físicas. El efecto de las sales predomina sobre el del sodio. Por lo tanto, estos suelos están bien estructurados. Por lo tanto la infiltración y conductividad hidráulica no se encuentran comprometidas. Las sales presentes generarán estrés hídrico para las plantas por el alto potencial osmótico. También puede aparecer toxicidad a ciertos iones.

La corrección de los suelos salino-sódicos es mediante el enyesado y el lavado de las sales. Sin embargo, como se aclarara anteriormente para los suelos sódicos y salinos, muchas veces conviene utilizar especies adaptadas, por ejemplo la de los pastizales naturales, para una alimentación de animales de bajos requerimientos.

Bibliografía

- ADAMS F. 1984. Crop responses to lime in the Southern United States. En: F Adams (Ed) Soil acidity and liming. ASA, CSA, SSSA, Madison. p: 211-265.
- ÁLVAREZ CR, G RUBIO. 2010. Acidez, parámetros efectos sobre los cultivos y manejo. En: R Álvarez et al (Eds) Fertilidad de suelos. Caracterización y manejo en la Región Pampeana. P 59-74.
- AYERS RS, DW WESTCOT. 1985. Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29 Rev.1, Roma, 174 p.
- DAMIANO F. 2014. <http://inta.gob.ar/noticias/tecnicas-para-manejar-el-agua-en-campos-bajos>
- EMERSON W. Soil salinity under irrigation: processes and management. Berlin: Springer, 1984. 432 p.
- GOMEZ LA, GA CRUZATE. 2007. Aptitud de los Suelos Argentinos para el Pecan (*Carya illinoensis*) En: RS Lavado, EA Frusso (Eds). Producción de pecán en Argentina. Capítulo V.
- TABOADA MA, CR ÁLVAREZ. 2008. Introducción a la fertilidad física. En: MA Taboada, CR Álvarez (Eds). Fertilidad física de los suelos. Editorial Facultad de Agronomía: 1-8.
- TISDALE S, WL NELSON, KD BEATON, JL HAVLIN. 1993. Soil fertility and fertilizers, New York.
- VAZQUEZ M, O MAIOLA, SI BESTEIRO. 2014. Manejo de suelos con exceso de agua. Universidad Nacional de La Plata.

LIMITANTES FÍSICAS DE LOS SUELOS

Carina R. Álvarez y Helena Rimski-Korsakov

Calidad física de los suelos

La calidad física edáfica comprende a aquellas propiedades físicas del suelo que afectan el crecimiento vegetal. Una buena calidad física del suelo determina: una alta resistencia a la degradación por acción de agentes naturales y antrópicos, un ambiente favorable para el desarrollo de las raíces y de la biota del suelo y una adecuada capacidad para amortiguar déficit hídricos. La calidad física del suelo está determinada genéticamente (calidad intrínseca) y, a su vez, es modificada por el manejo antrópico (calidad dinámica) (Álvarez y Taboada, 2008).

Las principales características que definen la calidad física son la textura y la estructura del suelo. La fase sólida del suelo está formada por partículas minerales de diferente tamaño, y por la materia orgánica humificada (Tabla 1). La distinta proporción de arcilla, arena, limo define la textura del suelo. La textura y mineralogía del suelo son de importancia, ya que determinan una gran cantidad de características edáficas como la cantidad de agua disponible que puede almacenar, la capacidad de expansión-contracción, la formación de estructura, entre otras. El componente más reactivo es la arcilla. Mayores contenidos de arcilla aumentan: el área superficial, la contracción-expansión, la retención hídrica, la plasticidad, la porosidad total, la capacidad de intercambio catiónico (CIC), y disminuyen: la tasa de infiltración y la densidad aparente. Por otro lado, un contenido adecuado de arena asegura la presencia de macroporos y con ello mayor infiltración y aireación (Taboada, 2012).

El otro componente sólido es la materia orgánica que actúa sobre numerosas propiedades físicas: aumenta el área superficial, la expansión, la retención hídrica, la porosidad y la CIC. También tiene un efecto beneficioso al disminuir la susceptibilidad del suelo a la degradación (erosión y compactación).

A su vez, las partículas minerales se unen entre sí y con la materia orgánica conformando agregados. Del ordenamiento de las partículas minerales y los agregados surge un sistema de poros característico. Dichos poros, cumplen distintas funciones según su tamaño y pueden portar agua o aire. Una forma de definir a la estructura es como el ordenamiento de la heterogeneidad espacial de las partículas, agregados y poros de los suelos (Kay, 1990). Este ordenamiento muestra que en los suelos coexiste un enorme rango de medidas, que va de un nivel molecular (nanómetros) a un nivel visible a simple vista (centímetros), unidades simples (partículas), otras complejas (agregados) y espacios vacíos (poros). Cada componente del suelo tiene diferentes rangos de tamaños, funciones y formas de vida específicas relacionados (Tabla 1).

Tabla 1. Variación de tamaño de diferentes componentes del suelo.

	Componentes	Tamaño
Partículas minerales	Arcilla	< 2 μm
	Limo	2-20 μm
	Arena	20 μm - 2mm
	Grava-Roca	> 2 mm
Componente orgánico	MO fina/bacterias/hongos	< 53 μm
	MO particulada	> 53 μm
	Pelos radicales	10-100 μm
	Raíces	> 100 μm
	Macrofauna	> 1 mm
Agregados	Microagregados	< 250 μm
	Macroagregados	> 250 μm - 20 mm
	Terrones	> 20 mm
Poros	Microporos	< 0.3 μm
	Mesoporos	0.3-50 μm
	Macroporos/grietas	> 50 μm

De esta enorme diversidad de tamaños, la mayor parte depende de las propiedades genéticas de los suelos (e.g. textura, mineralogía de arcillas, etc.), y es poco afectada por el manejo. El ser humano por medio de sus prácticas solo incide a nivel de los macroagregados (250 μm - 2 mm de diámetro) y terrones (> 2 mm) del suelo. También, dentro de los poros, sólo afecta a los macroporos (> 50 μm de diámetro) existentes dentro y entre los macroagregados. El drenaje rápido, la aireación y el crecimiento radical son, en consecuencia, los procesos más afectados cuando un suelo sufre deterioro estructural. Por ejemplo, lo anterior puede surgir como resultado de la compactación causada por el pisoteo animal, los rodados agrícolas, las labranzas, etc.

Limitantes de la calidad física del suelo

Los suelos pueden tener diferentes limitantes físicas que impidan o limiten el crecimiento radical o la emergencia de las plántulas. Dentro de ellas las más importantes son la tosca, los panes de arcilla, la capacidad de almacenamiento de agua y la erosión (Taboada *et al.*, 2012).

Tosca

La tosca es un horizonte duro, continuo conformado por carbonatos de calcio, y en algunos casos magnesio, cementado (“horizonte petrocálcico”; Figura 1). No puede ser penetrado con barrenos representando una barrera absoluta para las raíces. La tosca es, por lo tanto, una impedancia mecánica de origen genético que se encuentra a profundidad variable.



Figura 1. Suelo con tosca en la cuenca del Río Quequén (provincia de Buenos Aires). <http://www.monografias.com/trabajos59/dos-suelos/dos-suelos2.shtml>.

La herramienta más tradicional para detectar la presencia de tosca es un muestreador de durezas que consiste en una varilla metálica graduada con punta (Figura 2, pinche). El mismo es clavado a intervalos regulares en el lote y se toma la profundidad a la que se encuentra la tosca.



Figura 2. Muestreador de durezas (pinche; http://www.meridiens.com.ar/productos_muestreadoresmanuales.html).

La tosca limita la profundidad efectiva del suelo, representando un límite absoluto para el crecimiento radical. En consecuencia, el suelo tiene una capacidad menor de almacenamiento de agua y nutrientes. Los diferentes cultivos se ven afectados en distinto grado. La respuesta de los cultivos a la profundidad del suelo está fuertemente influenciada por la etapa fenológica del cultivo y las lluvias. Sadras y Calviño (2001) evaluaron la reducción del rendimiento en función de la profundidad de la tosca. El impacto en maíz fue alto, bajo para soja y trigo e intermedio para girasol (Figura 3). El trigo se ve menos afectado por crecer en invierno-primavera. En este periodo el balance hídrico es relativamente favorable, por lo que la menor capacidad de almacenar agua en suelos con tosca más superficial, afectan menos el rendimiento. Entre los cultivos de verano el maíz es el que más se resiente, ya que tiene un período de floración muy acotado en el tiempo, y la falta de agua en dicho período produce una reducción marcada del rendimiento. La soja presenta mayor plasticidad y capacidad de compensar déficit hídricos temporales debido a su floración escalonada.

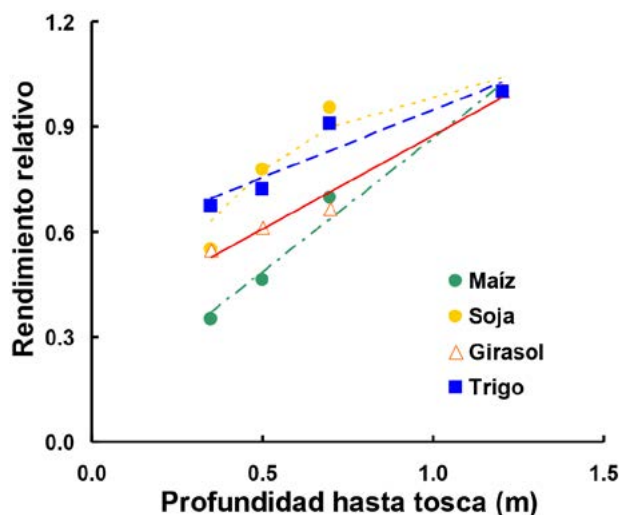


Figura 3. Rendimiento relativo del grano para trigo, soja, girasol y maíz en función de la profundidad del suelo. Los modelos se ajustan a los datos con una probabilidad de $P < 0.0005$ (adaptado de Sadras y Calviño, 2001).

Los suelos con tosca cerca de la superficie son un problema muy frecuente en amplios sectores de la región pampeana. Esta limitante está presente en la zona semiárida, (área de influencia de Carmen de Patagones), húmeda (área de influencia de Balcarce), así como en la Pampa Deprimida (Figura 4).

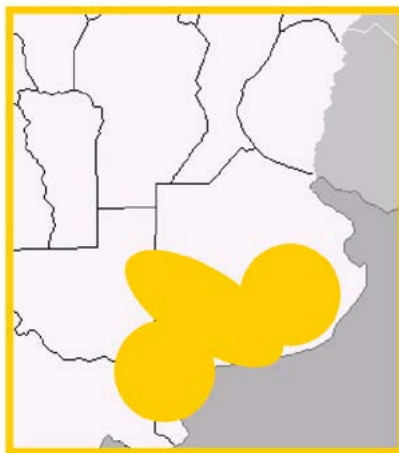


Figura 4. El área coloreada indica zonas con suelos que presentan tosca en la Región Pampeana.

El manejo de suelos con tosca se basa en elegir los cultivos que se adapten mejor a la reducción de la profundidad efectiva del suelo. Esto puede deducirse de la Figura 3 donde se ve el grado de afectación variable de los principales cultivos de grano de la región. A ello, se suma, el ajuste de insumos a la capacidad de producción de estos suelos, por ejemplo la reducción de la dosis de fertilizantes o enmiendas. La producción ganadera puede ser una alternativa cuando se presenta esta limitante. La utilización de riego minimiza el impacto de esta limitante sobre el rendimiento.

Horizonte Bt fuertemente textural (alto contenido de arcilla)

Algunos suelos presentan un horizonte Bt con alto contenido de arcillas representando un fuerte salto de textura comparándolo con el horizonte superior, del cual está separado

por un límite neto y definido. Estos horizontes no son una impedancia absoluta, ya que con buen contenido hídrico pueden ser explorados y/o atravesados por las raíces.

El origen de este horizonte fuertemente textural responde a la acumulación iluvial de arcillas (Argiudoles Vérticos) en la Pampa Ondulada o a suelos poligenéticos en la Pampa Arenosa. Estos últimos son Hapludoles Thapto Argicos, nombre de uso local que fue propuesto por el INTA, para denominar a suelos poligenéticos desarrollados sobre dos materiales superpuestos de distinta edad geológica (SAGYP-INTA, 1989). Este horizonte argílico se presenta a distintas profundidades. Ambos suelos tienen una distribución areal definida. Por lo tanto, podemos deducir su presencia en función de la localización, así como su detección a partir de la lectura de la carta de suelo, o a campo por dureza o textura. El horizonte B presenta barnices abundantes (*"clay skins"*), que son el registro de la intensa iluviación de arcilla durante su formación. Asimismo, los horizontes Bt vérticos sufren cambios muy importantes de volumen por expansión-contracción durante los ciclos de humedecimiento-secado. El registro de estos cambios son las grietas de secado que separan los prismas y planos de deslizamiento (*"slickensides"*) en las caras de esos prismas.

En la Figura 5 se muestra las áreas donde prevalecen los suelos con esta limitante. En el este de nuestra Pampa Ondulada, y en una parte importante de la Provincia de Santa Fe y Entre Ríos (1). Por otro lado, los suelos poligenéticos (Thapto argicos) se encuentran en la Pampa Arenosa (2).

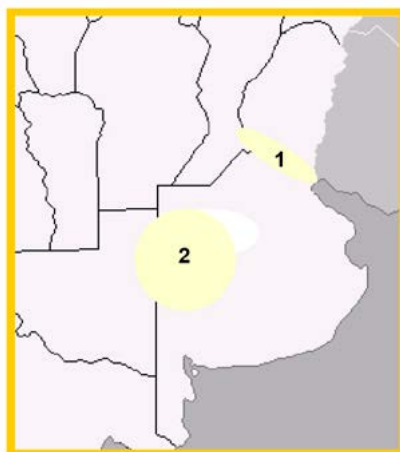


Figura 5. El área amarilla indica zonas áreas con suelos 1: Argiudol vértico (suelos con pan de arcilla) y 2: Thapto Argicos (adaptado de INTA, 2015).

La presencia de horizonte fuertemente textural trae diferentes problemáticas. Por un lado, la conductividad hidráulica del subsuelo suele ser lenta, dificultando el drenaje en ambientes muy húmedos. Por otro lado, debido a su dureza las raíces encuentran dificultades para explorarlo, distribuyéndose en forma heterogénea sobre la superficie de los prismas, aprovechando las grietas de secado. Este confinamiento en superficie de las raíces o la falta de una buena exploración del horizonte Bt tiene efecto negativo sobre el aprovechamiento del agua. Esto se vuelve más evidente en años con déficit hídrico. En la Pampa Arenosa se cuantificó reducciones del 7% del rendimiento del cultivo de soja comparando suelos thapto con suelos sin esta limitante (Barraco y Diaz-Zorita, 2014).

El manejo de suelos con esta limitante se basa en elegir los cultivos que se adapten mejor al déficit hídrico. Se puede decidir el cultivo a implantar considerando las predicciones meteorológicas en la estación de crecimiento. También se deberían ajustar las dosis de

insumos agregados a la capacidad de producción de estos suelos, por ejemplo la reducción de la dosis de fertilizantes o enmiendas, en relación a suelos sin esta limitante.

Capacidad de almacenaje de agua útil

La capacidad de almacenaje de agua útil del suelo es la cantidad de agua que puede acumular el suelo entre los puntos de capacidad de campo y marchitez permanente, hasta un metro y medio de profundidad. Tomaremos esta profundidad como referencia ya que la mayor parte del agua extraída por el cultivo proviene de ella, sin embargo es variable según el cultivo, anual o perenne, distintas especies, y si hay napa cercana a la que puedan acceder.

El contenido de agua útil de un suelo se calcula según:

$$LAU = \sum \text{capas de 0 a 150 cm} [(HV_{cc} - HV_{pmp}) * \text{espesor de la capa}]$$

Y la capacidad de almacenaje de agua útil se calcula para cada horizonte o capa de suelo hasta la profundidad de exploración radical.

Donde: LAU es lámina de agua útil hasta 150 cm expresada en mm, HV_{cc} y HV_{pmp} : es la humedad volumétrica del suelo en capacidad de campo y punto de marchitez permanente de cada capa, expresada en cm^3 de agua cm^3 de suelo⁻¹ y el espesor de cada capa, en mm.

La capacidad de almacenaje de agua útil depende de la textura, la materia orgánica y de la profundidad efectiva. La textura y la materia orgánica actuarían afectando la porosidad del suelo. En relación a la profundidad efectiva podemos encontrar como limitante absoluta la tosca y parcial los horizontes Bt fuertemente texturales.

Tabla 2. Lámina de agua útil en suelos de las distintas subregiones pampeanas. Se consideró 1.5 m de profundidad excepto en el caso del Argiudol Petrocálcico donde la tosca limitó la profundidad de enraizamiento a los 70 cm. Calculado con ecuaciones de Rawls *et al.*, 1982.

Suelo	Textura	LAMINA DE AGUA UTIL (mm)
Argiudol típico Norte de Buenos Aires	franco limoso a arcillo limoso	270
Argiudol típico SE Bonaerense	franco	220
Argiudol Petrocálcico SE Bonaerense	franco/tosca a 70 cm	125
Ustipsament	franco a franco arenoso	125

La productividad del suelo y el rendimiento de los cultivos en secano están fuertemente relacionados con la capacidad de almacenaje de agua útil. Esta propiedad está asociada a la capacidad del suelo de amortiguar déficits hídricos en períodos de sequía. En el mapa a continuación se presentan las distintas capacidades de almacenaje de agua útil de los suelos de la Región Pampeana (Daminano y Taboada, 2000, Figura 6). Las mismas se calcularon hasta el metro de profundidad, excepto en las áreas donde el suelo presenta tosca y panes de arcilla, donde se calculó hasta la profundidad de las mismas. Es importante destacar que los cultivos pueden extraer agua a mayor profundidad si no encuentran impedimentos para el desarrollo radical. Se observa una disminución del agua útil hacia el Oeste de la región debido al aumento de las arenas, o en las zonas donde hay tosca (SE y SO bonaerense) o hacia el Río Paraná debido a altos contenidos de arcilla y presencia de panes de arcilla.

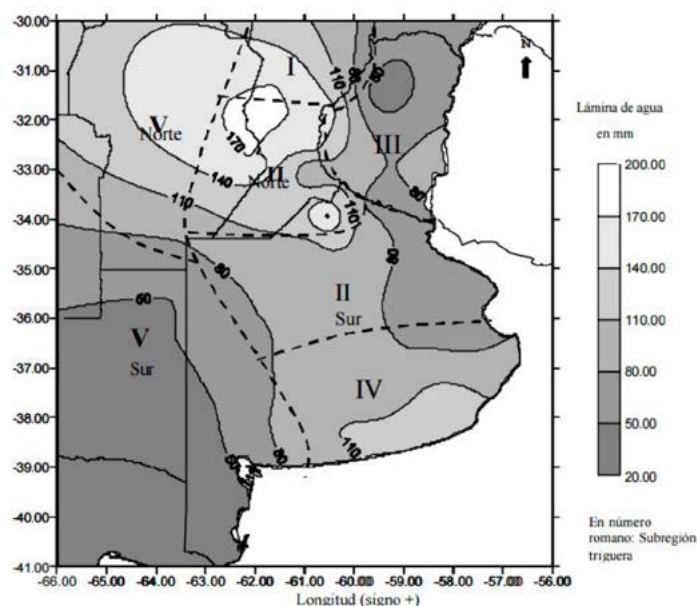


Figura 6. Lámina de agua útil de los suelos de la Región Pampeana (tomado de Daminano y Taiboada, 2000). Se calculó la lámina hasta el metro o hasta la tosca o Bt fuertemente textural. Los números romanos indican las subregiones trigueras.

La capacidad de almacenaje está principalmente determinada por factores genéticos. Sin embargo, el hombre puede realizar prácticas que modifican el ingreso de agua al suelo (infiltración), o la evaporación y el escurrimiento. Prácticas como siembra directa y cobertura mejoran la infiltración, disminuyen el escurrimiento y la evaporación. También se propone alternar regularmente cultivos con raíces profundas, para aprovechar recursos (agua y nutrientes) existentes en horizontes profundos o bien tener situaciones de policultivo o cultivos asociados que aprovechen el agua de distintos estratos del suelo.

Erosión hídrica y eólica

La erosión hídrica y eólica es la pérdida de suelo por acción del agua o el viento, respectivamente. Implica una degradación irreversible del recurso suelo. La erosión es causada por la acción directa de los factores erosivos, agua y viento, sobre el suelo provocando su migración. La erosión es causada por el manejo antrópico a consecuencia de estar el suelo descubierto y/o con alta inestabilidad estructural. En el caso de la erosión hídrica, factores de relieve como pendientes pronunciadas o largas, y suelos arcillosos con baja infiltración, aumentan los riesgos de erosión.

La ocurrencia de erosión hídrica se determina por la observación de surcos y cárcavas, y evaluando la profundidad hasta el horizonte Bt. Al comparar la profundidad evaluada con la declarada en la carta de suelo, realizada generalmente hace una cantidad de años importante, se estiman las pérdidas de suelo en centímetros. Así como hay zonas de pérdida de suelo, hay zonas donde el material se depone. En estos casos se ve un aumento de la profundidad del horizonte superficial.

En el caso de la erosión eólica la pérdida de suelo es selectiva, ya que el viento arrastra las partículas más finas (arcillas y materia orgánica). Estas partículas son de vital importancia en los ambientes más arenosos por su aporte a la capacidad de retención de agua y nutrientes. El proceso de erosión eólica puede verse a simple vista por el movimiento de las partículas de suelo en el aire.

La pérdida de suelo por erosión es una degradación irreversible que afecta la capacidad productiva de los suelos. Por ejemplo, en la Tabla 3 se presentan las variaciones de inestabilidad estructural, materia orgánica y rendimiento promedio de 3 años de trigo y soja de segunda en un ensayo de decapitación de suelos. En el ensayo se realizó el retiro de distintos espesores del horizonte A. La ausencia del horizonte A produjo reducciones de 66 y 43% del rendimiento del trigo y de la soja de segunda, respectivamente.

Tabla 3. Inestabilidad estructural, materia orgánica (MOT) y rendimiento promedio de tres años de trigo y soja de segunda en Marcos Juárez (Córdoba) en suelos son distinto espesor de horizonte A (Gudelj y Weir, 2000). El muestreo fue realizado de 0-15 cm.

	Espesor del horizonte A (cm)				
	20	15	10	5	0
Inestabilidad estructural (mm)	1,21	1,89	2,14	2,26	2,31
MOT (%)	2,78	2,41	2,39	1,97	1,7
Trigo (kg/ha)	2106	1602	1407	949	718
Soja (kg/ha)	2307	2049	1782	1556	1319

En los mapas mostrados en la Figura 6 se presentan las zonas del país afectadas por erosión hídrica (A) y eólica (B). Puede observarse que las zonas más al Este, porción húmeda, están afectadas por erosión hídrica y al Oeste por erosión eólica. En el año 1986 se hablaba de un 35% de la superficie argentina afectada por erosión.

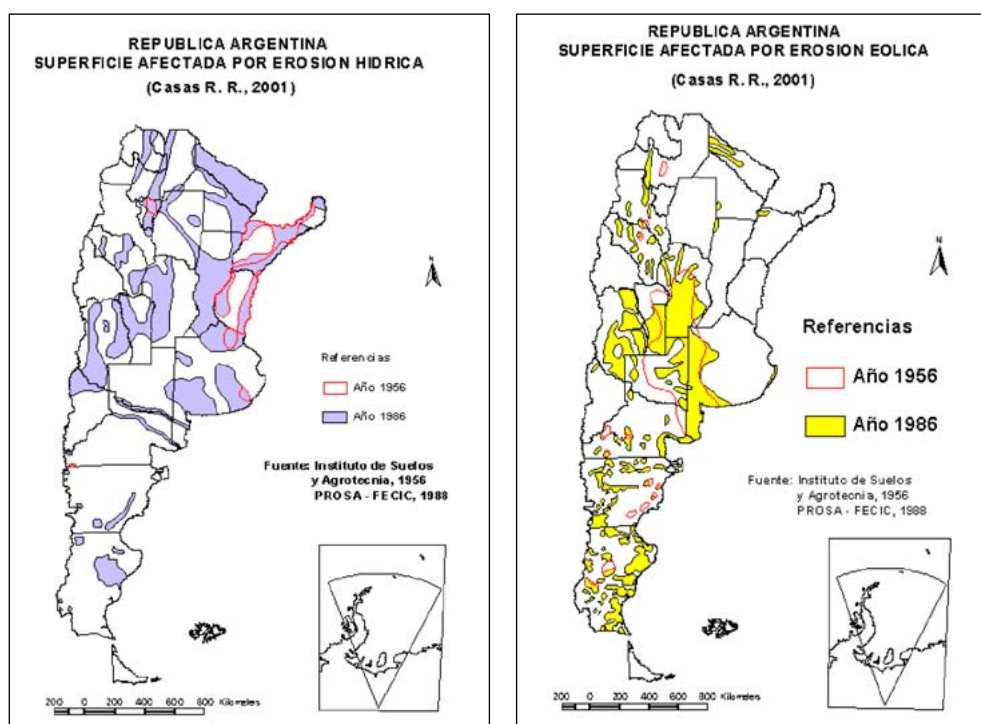


Figura 6. Suelos afectados por erosión hídrica y eólica (tomado de Casas, 1998).

Para prevenir la erosión, el suelo debe presentar una alta resistencia a la degradación. Dos propiedades fundamentales que permiten la caracterización de la resistencia a la degradación son la estabilidad estructural y la cobertura viva o muerta del suelo.

En la Pampa Ondulada se muestrearon situaciones con diferentes manejos: referencias (parques), sistemas mixtos en siembra directa (MIXTOS-SD), sistemas en agricultura

continua en siembra directa (AGR-SD), o bajo labranza (AGR-LC). En la Figura 7 se observa que la inestabilidad estructural muestra una progresión creciente según: REFERENCIA < MIXTOS-SD < AGR-SD < AGR-LC. La ausencia de remoción del suelo y la presencia de raíces vivas contribuyen a mejorar la estabilidad de la estructura del suelo, ante la falta de cambios en el componente orgánico edáfico. Ello es particularmente visible por los menores valores de inestabilidad estructural en las REFERENCIAS y MIXTOS-SD, que incluyen especies perennes en su secuencia.

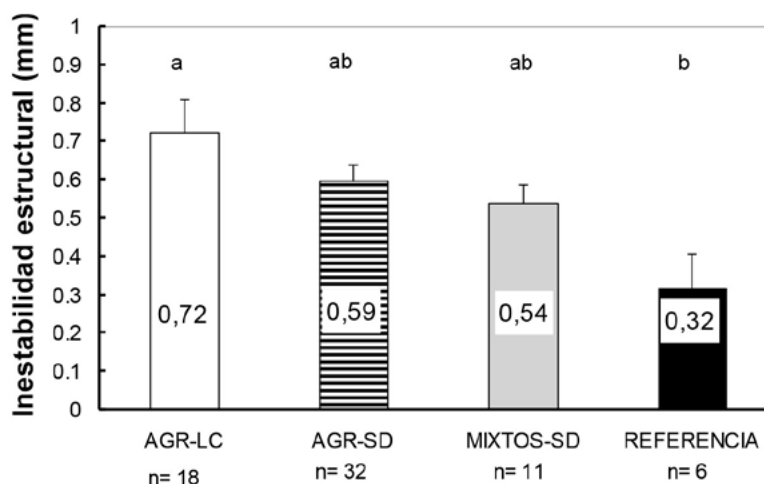


Figura 7. Inestabilidad estructural bajo distintos sistemas de manejo en la Pampa Ondulada (Álvarez *et al.*, 2012). AGR-LC: agricultura continua con laboreo, AGR-SD: agricultura continua en siembra directa, MIXTOS-SD: sistemas mixtos en siembra directa y REFERENCIAS: cascos o parques de estancia. Letras distintas indican diferencias significativas $P < 0,05$. Los números en las barras indican el valor medio de la inestabilidad en cada situación. Las barras verticales indican el error estándar.

La metodología de evaluación de la inestabilidad estructural no está difundida a nivel de laboratorios. Por lo cual, lo que se recomienda es realizar prácticas tendientes a mantener o mejorar la materia orgánica, asegurar presencia de raíces vivas y utilizar siembra directa o labranzas conservacionistas. Estas prácticas permiten sostener una alta estabilidad estructural.



Figura 8. Maíz sobre rastrojo de trigo/soja de II o sobre soja de primera ambas situaciones en siembra directa.

También se debe asegurar una buena cobertura del suelo por el rastrojo o cultivo para minimizar el impacto del viento y de la lluvia. Una buena cobertura viene no solo de la mano del uso de labranzas conservacionistas sino también de una rotación que contenga cultivos que dejen importantes volúmenes de rastrojo (Figura 8). Si éstas medidas no son suficientes para disminuir los procesos erosivos, existen otras prácticas más complejas que pueden sumarse, como la realización de terrazas, cultivos en contorno, cultivos en franja, etc.

Compactaciones antrópicas

Se denomina compactación a la presencia de una capa de suelo que presenta una alta densidad aparente y/o dureza en húmedo y/o disminución de los macroporos y que resulta un impedimento parcial o absoluto para el desarrollo de las raíces o la emergencia de las plántulas. Como se mencionó en los primeros apartados del capítulo, el hombre con el manejo puede alterar los macroagregados y los macroporos relacionados con ellos. Como lo dice su denominación, compactaciones antrópicas, las mismas son producidas por el manejo del suelo y pueden ser clasificadas según a la profundidad que se presentan y al origen de la misma (Tabla 4).

Tabla 4. Compactaciones antrópicas, profundidad y manejo que las generan.

Profundidad	Nombre	Situación de manejo donde se presenta/origen
0 - 5 cm Extremadamente superficiales	Encostramiento superficial	Suelos laboreados y muy refinados
0 - 10 cm Superficiales	Compactación de la cama de siembra por tránsito	Siembra directa (interviene más la presión ejercida por las máquinas)
0 - 10 cm Superficiales	Compactación por pisoteo animal	Producción ganadera, sistemas mixtos
20 - 30 cm Subsuperficiales	Piso de arado	Labranza con arado de reja y vertedera
10 ~ 50 cm Subsuperficiales	Tránsito	Tránsito de maquinaria (interviene más el peso de la maquinaria)

Por ejemplo, en la Figura 9 se presenta la densidad aparente de 0-15 cm de profundidad. En ella se observa que la densidad aumenta según referencias o parques < agricultura con laboreo < agricultura con siembra directa < sistemas mixtos en siembra directa.

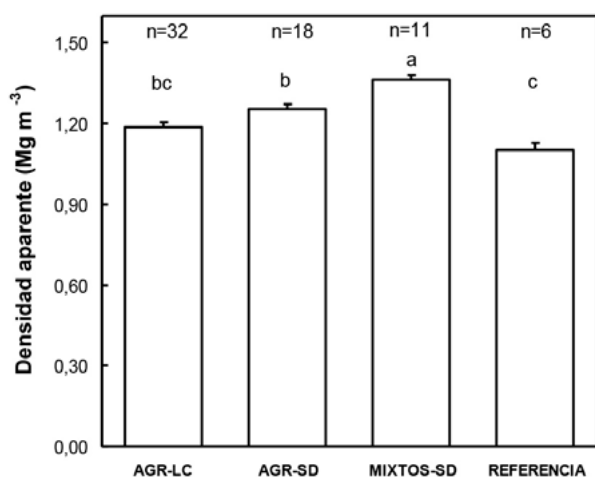


Figura 9. Densidad aparente de 0-15 cm bajo distintos manejos en la Pampa Ondulada (Álvarez *et al.*, 2012). AGR-LC: agricultura continua con laboreo, AGR-SD: agricultura continua en siembra directa, MIXTOS-SD: sistemas mixtos en siembra directa y REFERENCIAS: cascos o parques de estancia. Letras distintas indican diferencias significativas $P < 0,05$. Las barras verticales indican el error estándar.

La presencia de una capa compacta puede detectarse de manera sencilla realizando un pozo en el suelo, extrayendo una muestra del mismo, y luego evaluando el tipo de estructura presente. Capas con estructura masiva, o laminar, indican compactación. En el anexo al final del capítulo se presenta una carta de evaluación a campo de estructura propuesta por Scotland's Rural College (2016). Es importante trabajar con una humedad cercana a capacidad de campo.

Existen métodos que permiten realizar una evaluación más cuantitativa de la presencia de compactación. Ellos son: la densidad aparente y la resistencia a la penetración. La densidad aparente se determina habitualmente con el método del cilindro y en términos generales valores superiores a 1.5 Mg m^{-3} indican compactación. Es importante aclarar que la densidad del suelo varía con la textura, los suelos arenosos poseen naturalmente más densidad que los arcillosos. La resistencia a la penetración se determina con un penetrómetro (Figura 10) y, valores superiores a 2 MPa, medido en capacidad de campo, indican la presencia de una capa endurecida.



Figura 10. Penetrómetro de golpes (<http://www.copains.com.ar/compactacion.htm>).

En la Tabla 5 se presentan los efectos que provocan las diferentes compactaciones.

Tabla 5. Compactaciones antrópicas, profundidad y efectos sobre el cultivo o propiedades edáficas.

Profundidad	Nombre	Efectos
0 - 5 cm Extremadamente superficiales	Encostramiento superficial	Dificultad de emergencia, si el cultivo se encuentra recién sembrado Escurrimiento superficial de agua y erosión hídrica
0 - 10 cm Superficiales	Compactación de la cama de siembra por tránsito	Emergencia desapareja del cultivo Menor exploración radical Menor infiltración
0 - 10 cm Superficiales	Compactación por pisoteo animal	Menor exploración radical Menor infiltración
20 - 30 cm Subsuperficiales	Piso de arado	Menor exploración radical por debajo de la compactación
10 - 50 cm Subsuperficiales	Tránsito	Menor exploración radical

Cabe destacar que el grado de disminución de la exploración radical depende de la gravedad de la impedancia y de la humedad al momento de ser atravesada por las raíces. Al estar el suelo más húmedo la resistencia disminuye.

Existen distintas estrategias para manejar la compactación en suelos agrícolas basadas en su prevención o en su remediación. En la Figura 11 se presentan las diferentes opciones de manejo desde cada una de las estrategias. Entre ellas se encuentran el tránsito controlado, aplicar menor presión de neumáticos, el momento del tránsito, la descompactación, el aumento del contenido de materia orgánica, presencia de raíces vivas, entre otras.

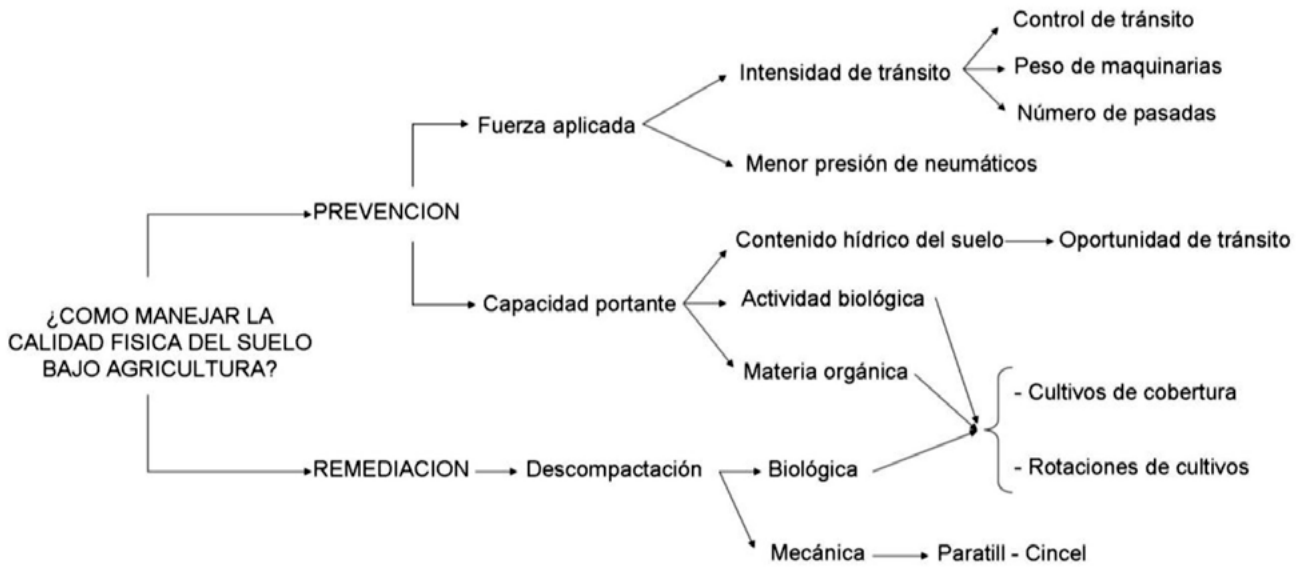


Figura 11. Estrategias de prevención y remediación de la compactación (Álvarez y Fernández, 2015).

Para conocer el beneficio económico de aplicar éstas estrategias es necesario por un lado, conocer el costo de la práctica y, por el otro, el impacto de la compactación sobre el rendimiento y/o el aumento que produce ésta en los costos de producción (mayor requerimiento de fertilizantes, o energía en la siembra).

Una revisión realizada a nivel mundial presenta el incremento del rendimiento comparando áreas sin tránsito respecto de situaciones bajo tránsito convencional (Chamen *et al.*, 2015). Se puede observar que el impacto es variable entre los cultivos analizados (Figura 12), siendo también distinto según el tipo de suelo y clima. Asimismo, estimaron el aumento o disminución de los márgenes brutos de distintas estrategias de mitigación y corrección de la compactación sobre el cultivo de trigo, mostrando variaciones positivas y mayores de las prácticas de prevención sobre las de remediación.

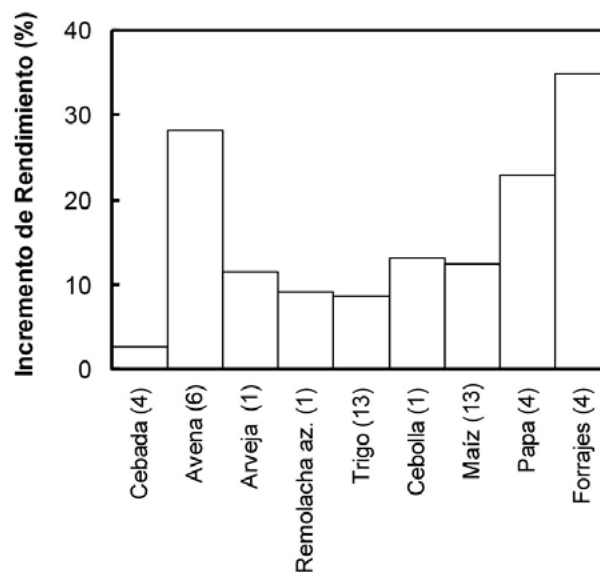


Figura 12. Aumento del rendimiento atribuible a la ausencia de tránsito (comparando situaciones sin tránsito y con tránsito normal). Adaptado de Chamen *et al.* (2015).

Botta *et al.* (2007) proponen un ensayo con distintos ordenamientos del tránsito en el lote durante la operación de cosecha. En la Figura 13 se muestra el rendimiento medio de tres años de evaluación (Campañas 2004/05, 2005/06 y 2006/07). Los dos tratamientos que ordenaron la cosecha no presentaron diferencias entre ellos, siendo mayores a aquel donde no se ordenó. Los autores concluyen la conveniencia económica del ordenamiento del tránsito derivada del aumento de rendimiento y del menor consumo de gasoil, a pesar de que disminuye la capacidad operativa.

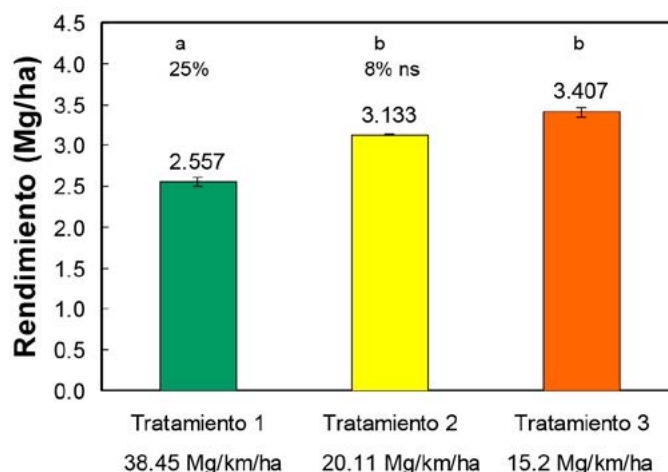


Figura 13. Rendimiento medio del cultivo de soja de los tres años de ensayo (2004/05, 2005/06 y 2006/07) para las tres intensidades de tránsito (Botta *et al.*, 2007). Las barras verticales indican el error estándar y se presenta el valor de la media de cada tratamiento. Las distintas intensidades de tránsito de cosecha se logran en el Tratamiento 2 descargando en calle central y cabecera y en el Tratamiento 3 en cabecera. En el caso del Tratamiento 1 el carro tolva transita por todo el lote.

Según se indicó en la Figura 11 dentro de las medidas de corrección de la compactación está la descompactación mecánica. La detección de compactación o endurecimiento superficial en SD y una menor infiltración -visualizada muchas veces en forma de encharcamiento temporal- ha llevado a proponer el uso de descompactadores en la región pampeana como una estrategia de remediación. A lo largo de la última década se realizaron distintos ensayos especialmente en los cultivos de maíz y soja. Si bien, en general se observaron respuestas positivas, la magnitud rondó el 6% y el efecto duraba un corto plazo, ya que se recompactaba en la próxima cosecha debido al peso de la maquinaria y a que el suelo generalmente está húmedo y, por lo tanto, más compactable.

En situaciones de producción intensiva, como la producción hortícola, es común el refinamiento del suelo con la realización de varias labores. Allí se recomienda la utilización de abonos orgánicos, mantener el suelo cubierto, disminuir las labores (uso de laya), o tener raíces vivas la mayor parte del año para favorecer todos los mecanismos de agregación del suelo y su estabilidad.

Bibliografía

- ÁLVAREZ CR, MA TABOADA. 2008. Indicadores de la calidad física del suelo. En: Fertilidad física de los suelos. CR Álvarez, MA Taboada (Eds): 155-180.
- ÁLVAREZ CR, PL FERNANDEZ, MA TABOADA. 2012. Relación de la inestabilidad estructural con el manejo y propiedades de los suelos en la Región Pampeana. Ciencia del Suelo 30: 173-178

- ÁLVAREZ CR, PL FERNANDEZ. 2015. La compactación de los suelos bajo agricultura. Simposio IPNI Fertilizar, Rosario. Actas en CD.
- BARRACO M, M DIAZ-ZORITA. 2014. Suelos y manejo en la producción de soja de la Pampa Arenosa. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bahía Blanca. Actas en CD
- BOTTA GF, O POZZOLO, M BOMBEN, H ROSATTO, D RIVERO, M RESSIA, M TOURN, E SOZA, J VAZQUEZ. 2007. Traffic alternatives for harvesting soybean (*Glycine Max L.*). Effect on yields and soil under a direct sowing system. *Soil and Tillage Research*. 96: 145-154
- CASAS RR. 1998. Causas y evidencias de la degradación de los suelos en la Región Pampeana. En *Hacia una agricultura productiva y sostenible en la pampa*. Editada por la Universidad de Harvard, Centro D. Rockefeller para estudios latinoamericanos y el CPIA, Argentina.
- CHAMEN WCT, AP MOXEY, W TOWERS, B BALANA, PD HALLET. 2015. Mitigating arable soil compaction: a review and analysis of available cost and benefit data. *Soil and Tillage Research* 146: 10-25
- DAMIANO F, MA TABOADA. 2000. Predicción del agua disponible usando funciones de pedo-transferencia en suelos agrícolas de la región pampeana. *Ciencia del Suelo* 18: 77-88.
- GUDELJ O, E WEIR. 2000. Estabilidad estructural y materia orgánica en distintos grados de erosión provocada, en un suelo Argiudol típico. XVII C.A.C.S. Mar del Plata, Argentina.
- INTA. 2015. Suelos de la provincia de Buenos Aires. En: <http://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/>. Ingreso: 29/07/2015.
- KAY BD. 1990. Rates of change of soil structure under different cropping systems. *Adv. Soil Sci.* 12: 1-52.
- RAWLS WJ, DL BRAKENSICK, KE SAXTON. 1982. Estimation of soil water properties. *Transactions of the ASAE* 25: 1316-1328.
- SADRAS VO, PA CALVIÑO. 2001. Quantification of grain yield response to soil depth in soybean, maize, sunflower and wheat. *Agronomy Journal* 93: 577-583
- SAGYP-INTA. 1989. Mapa de suelos de la Provincia de Buenos Aires. Proyecto PNUD/ARG/85/019.
- SCOTLAND'S RURAL COLLEGE. 2016. http://www.sruc.ac.uk/info/120625/visual_evaluation_of_soil_structure/1553/visual_evaluation_of_soil_structure_-_method_description. Ingreso: 5/7/2016.
- TABOADA MA, FG MICUCCI, CR ÁLVAREZ. 2012. Impedancias mecánicas y compactación en sistemas agrícolas. Sección 2. En: *Fertilidad de los Suelos. Caracterización y manejo en la Región Pampeana*. R Álvarez, G Rubio, CR Álvarez, RS Lavado (Eds): 97-112.
- TABOADA MA. 2012. Introducción, textura y estructura. Sección 2. En: *Fertilidad de los Suelos. Caracterización y manejo en la Región Pampeana*. Álvarez, R; Rubio, G.; Álvarez C.R., Lavado R.S.: 97-112.

Anexo. Evaluación visual de la estructura del suelo. Scotland's Rural College en http://www.sruc.ac.uk/info/120625/visual_evaluation_of_soil_structure/1553/visual_evaluation_of_soil_structure_-_method_description. Traducido por Juan Pablo Dieguez

Evaluación visual de la estructura del suelo.



La estructura del suelo afecta a la penetración de raíces, la disponibilidad de agua para las plantas y la aireación del suelo. Este sencillo método evalúa estructura del suelo basado en la observación y la manipulación de un bloque de suelo excavado con una pala. La escala de la prueba va de Sq1, buena estructura, a Sq5, mala estructura.

Equipo: Pala de punta aprox. 20 cm de ancho, 22 a 25 cm de largo. Opcional: folios, bolsas o bandeja de plástico de 50 x 80 cm aprox., cuchillo pequeño, cámara digital.


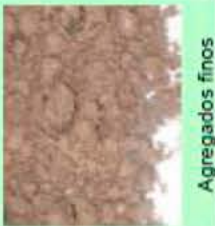



Cuando muestrear: Cualquier época del año, pero preferentemente cuando el suelo está húmedo. Si el suelo está demasiado seco o demasiado mojado no se obtiene muestra representativa. Las raíces se ven mejor en cultivos establecidos o meses después de la cosecha.

Donde muestrear: Seleccione un área de cultivo uniforme según el color del suelo o un área donde se sospecha que puede haber un problema. Dentro de esta área, planificar una grilla o patrón de recorrido donde tomar 10 muestras o más. En pequeñas parcelas experimentales, puede ser necesario restringir el número de muestras 3 o 5 por parcela.



Bruce Ball, SRUC (bruce.ball@sruc.ac.uk), Rachel Guimarães, University of Maringá, Brazil (rachellocks@gmail.com), Tom Batey, Independent Consultant (2033@tombatey.f2s.com) and Lars Munkholm, University of Aarhus, Denmark (Lars.Munkholm@agrsci.dk)

Método de evaluación		
Paso	Opción	Procedimiento
Extracción y examinación del bloque		
1. Extracción	Suelos sueltos	Cortar un bloque de suelo de 15 cm de espesor utilizando toda la profundidad de la pala y colocar la pala y el bloque sobre bandeja plástica sobre el suelo
	Suelos firmes	Excavar un agujero un poco más ancho y más profundo que la pala dejando a un lado sin mover. En el sitio no perturbado, cortar a los lados del bloque con la pala y retirar como anteriormente.
2. Examinar bloque de suelo	Estructura uniforme	Retirar el bloque compactado o los restos de todo el bloque
	Dos o más capas de estructuras diferentes	Calcular la profundidad de cada capa y luego asignar valores a cada uno por separado
Romper el bloque		manipular suavemente la muestra para ir separando las capas cohesivas o grupos de agregados. Si es posible separar el suelo en agregados naturales y terrones hechos por el hombre. Los terrones son grandes, duros, cohesivos y los agregados redondeados.
3. Separar agregados (opcional tomar una fotografía)		
4. Separar los agregados principales agregados para asignar puntaje		Romper las piezas más grandes pedazos y fragmentarla hasta conseguir agregados de 1,5 - 2,0 cm. Observa su forma, porosidad, raíces y facilidad de ruptura. Los terrones presentan agregados no porosos con esquinas angulares y son indicadores de una mala estructura y se le asigna el puntaje más alto.
Valoración del suelo		Comparar el suelo con las imágenes para determinar a que categoría pertenece
5. Asignar puntaje		
6. Confirmar puntuación desde:	Extracción de bloques	Los factores que aumentan el puntaje: La dificultad en la extracción del bloque
	Forma y tamaño de los agregados	Más grandes más angulares, menos porosos, presencia de grandes agujeros de gusano
	Raíces	Agrupamiento, engrosamiento y deflexiones
	Anaerobiosis	Capas del suelo color gris, con olor a azufre y presencia de iones ferrosos
	Fragmentación	Dividir los agregados grandes hasta 1.5 - 2.0 cm de diámetro de fragmento para determinar su categoría
7. Calcular el valor final según los diferentes horizontes		Multiplicar el puntaje de cada capa por su espesor y dividir el producto por la profundidad total: por ejemplo para un bloque de 25 cm con 10 cm de profundidad de tierra suelta (Sq1) y una capa más compacto (Sq3) a 10-25 cm de profundidad, al valor del bloque es $(1 \times 10) / 25 + (3 \times 15) / 25 = Sq\ 2.2$
Puntaje: Los valores pueden caer en categorías Sq si tienen las propiedades de ambas. Valores de 1-3 son generalmente aceptables mientras que los de 4 o 5 requieren un cambio de manejo. Consulte las directrices complementarias para obtener más detalles		

Calidad de la estructura	Forma y tamaño de los agregados	Porosidad visible y raíces	Apariencia después de la ruptura : diferentes suelos	Aspecto después de la ruptura : mismo suelo , diferente labranza	Diferencias funcionales	Apariencia y descripción de fragmentos de 1.5 cm de diámetro(aprox.)
Sq1 Friable Los agregados se desgranar fácilmente con los dedos.	Después de la ruptura , en su mayoría , son menores a 6 mm .	Altamente poroso. Raíces presentes en todo el suelo.			 Agregados finos	 La acción de romper el bloque es suficiente para separarlos. Los agregados grandes están compuestos por otros mas pequeños , cohesionados por las raíces .
Sq2 Entero Los agregados son fáciles de romper con una mano.	Diferentes tipos de poros , agregados redondeados desde 2 mm a 7 cm. No hay terrones presentes	La mayoría de los agregados son porosos. Raíces presentes en todo el suelo.			 Alto en agregación y porosidad	 Se obtienen agregados de forma redondeada , muy frágiles , que se disgregan muy fácilmente y son altamente porosos.
Sq3 Firme La mayoría de los agregados son fáciles de romper con una mano.	Diferentes tipos de poros , agregados de 2mm a 10 cm; hasta un 30% menores a 1 cm. Algunos agregados con forma angular, no porosa , puede estar presente (terrónes)	Presenta macroporos y grietas . Porosidad y raíces por dentro de los agregados.			 Bajo en agregación y porosidad	 Los fragmentos agregados son bastante fáciles de obtener. Tienen pocos poros visibles y son redondeadas. Las raíces crecen a través de los agregados .
Sq4 Compactado Requiere un esfuerzo considerable romper los agregados con una mano.	Principalmente mayores a 10 cm ; menos de un 30% son menores a 7 cm. Sub-angular y no poroso; también es posible encontrar forma laminar.	Pocos macroporos y grietas. Todas las raíces aparecen agrupados en los macroporos y alrededor de los agregados.			 Distintos macroporos	 Fragmentos agregados fáciles de obtener cuando el suelo está húmedo . cubos o prismas con aristas vivas y grietas internas
Sq5 Muy compactado Difíciles de romper	Principalmente mayores a 10 cm, muy pocos menores a 7 cm. Angular y no porosa.	Muy baja porosidad ; puede presentar macroporos ; pueden aparecer zonas anaeróbicas. Pocas raíces, si aparecen, restringidas a las grietas.			 Colores grises-azules	 Fragmentos agregados fáciles de obtener cuando el suelo está húmedo , aunque puede ser necesaria una fuerza considerable. Normalmente no hay poros o grietas visibles

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD PRODUCTIVA DE LOS SUELOS

Gerardo Rubio y Miguel A. Taboada

Se pueden distinguir dos etapas en la evaluación de la capacidad de un suelo para producir biomasa o grano previas a la decisión de su uso y eventual recomendación de fertilización:

- 1) Diagnóstico de la capacidad productiva (productividad)
- 2) Diagnóstico de la disponibilidad de nutrientes (fertilidad)

La primera etapa consiste en la determinación de la aptitud del suelo para sostener el crecimiento de cultivos. A partir de este diagnóstico, se individualizan las limitantes primarias del suelo, las cuales son clasificadas de acuerdo a un orden jerárquico que permita distinguir las limitantes de mayor y las de menor magnitud. Estas limitantes son las que, en definitiva, determinan si el suelo posee o no aptitud agrícola. Este diagnóstico se basa en la identificación de rasgos morfológicos del perfil del suelo que pueden afectar el crecimiento de los cultivos. Esta información debe ser complementada con las características del clima (i.e. régimen de lluvias y temperatura). Es preciso distinguir entre las limitantes de tipo irreversible (ej. tosca) y las de tipo reversible (ej. encostramiento superficial). Estas últimas se pueden subsanar total o parcialmente en el corto o mediano plazo mediante la realización de determinadas prácticas culturales.

Desde el punto de vista agronómico, los objetivos del diagnóstico de la capacidad productiva de un suelo son:

- i) reconocer las limitantes del suelo para el crecimiento de cultivos
- ii) evaluar la intensidad de estas limitantes y jerarquizarlas en orden de importancia
- iii) servir de base para diseñar prácticas agronómicas tendientes a la resolución de las limitantes halladas

En la Figura 1 se esquematizan las principales variables a considerar en el diagnóstico de la capacidad productiva de un suelo y en la Tabla 1 se presenta una clasificación de las limitaciones edáficas de acuerdo a su grado de reversibilidad.

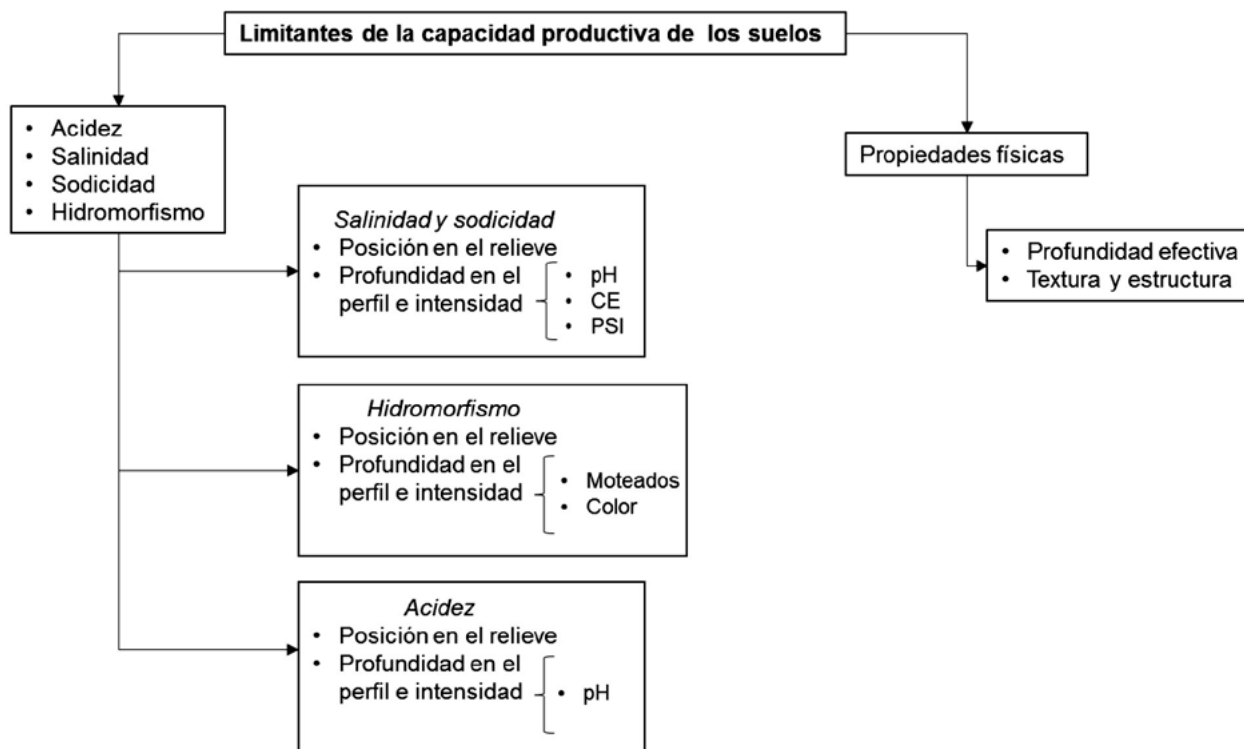


Figura 1. Limitantes de la capacidad productiva de los suelos de la Región Pampeana.

Tabla 1. Reversibilidad de las limitaciones edáficas. Algunos ejemplos.

Limitaciones	
Irreversibles o reversibles con mucha dificultad	Reversibles
Sodicidad	Disponibilidad de nutrientes
Hidromorfismo	Presencia de costras
Profundidad efectiva	Pisos de arado
Textura	Acidez
	Salinidad

Árbol de decisión para diagnosticar la capacidad productiva de un suelo para cultivos agrícolas

El diagnóstico de la capacidad productiva de un suelo es un acto profesional que requiere de cierta experiencia de campo y entrenamiento en el manejo de información cartográfica y de análisis de suelos. No obstante, pueden indicarse una serie de pasos que ayudan a realizar dicho diagnóstico en forma ordenada, yendo de lo general a lo particular. Estos pasos son presentados en la Figura 2 (Rubio y Taboada, 2013). El árbol de decisión que presenta la figura se basa en la evaluación de suelos loésicos, como los de la Región Pampeana. Dicho árbol es un cursograma con dos etapas sucesivas de diagnóstico: a nivel de paisaje y a nivel del perfil del suelo, y una etapa resolutoria, que confiere tres niveles diferentes de aptitud productiva para la producción de cultivos agrícolas.

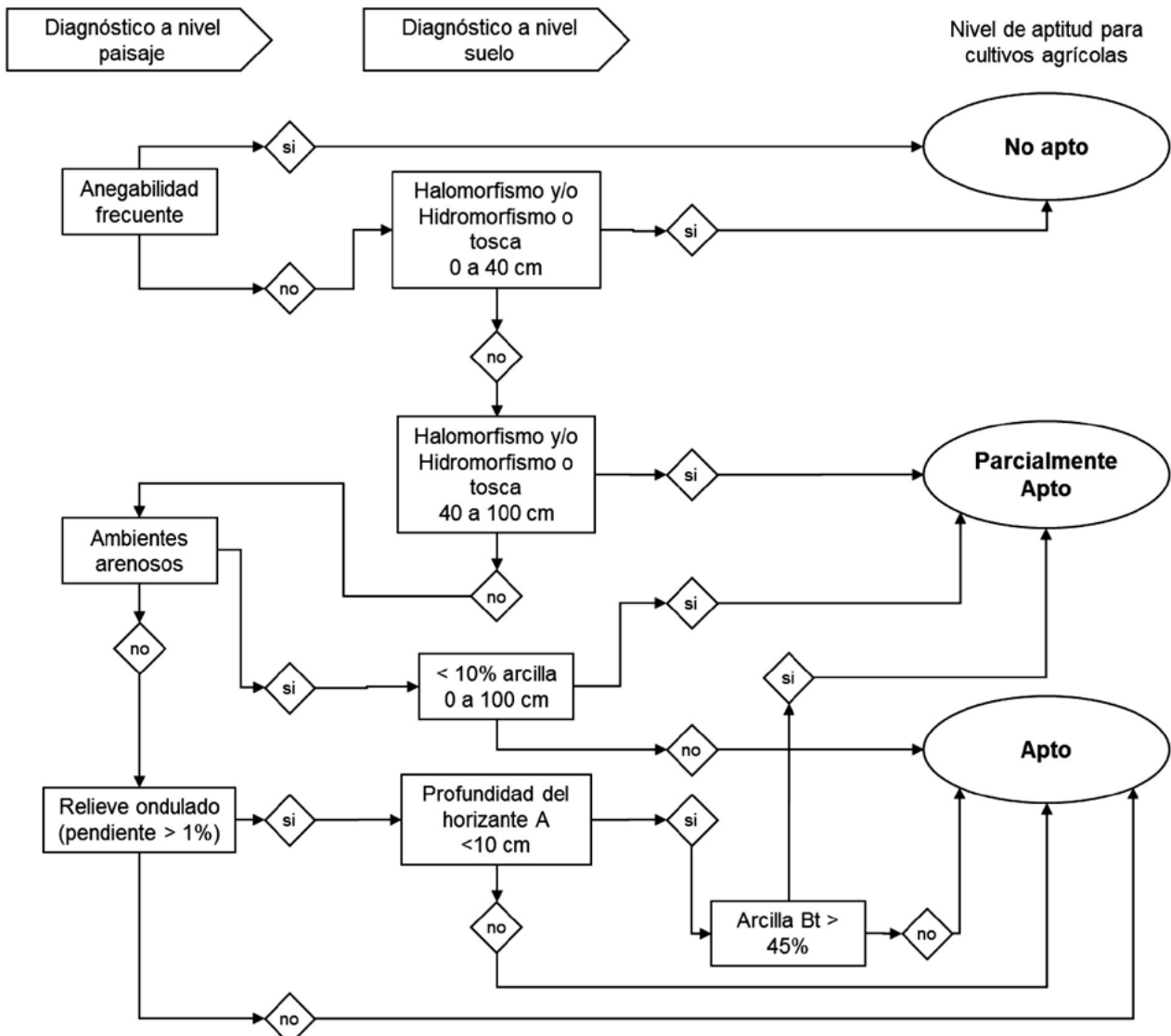


Figura 2. Árbol de decisión para diagnosticar la capacidad productiva de un suelo para cultivos agrícolas extensivos de secano basado en la Región Pampeana (Rubio, Lavado, 2013).

Yendo de lo general a lo particular, lo primero que debe hacerse es un estudio previo al viaje de campo en base a material cartográfico, fotografías aéreas e imágenes satelitales. La evaluación realizada en gabinete siempre debe ser chequeada a campo, donde debe observarse minuciosamente el paisaje adonde se encuentra un lote o un suelo determinado. De la información de imágenes y de campo surge si un suelo sufre inundaciones (agua externa al lote) y/o anegamientos (agua local) periódicos, algo que es relativamente fácil de identificar en imágenes con un patrón fotográfico propio de los campos bajos. Esta información debe ser corroborada a campo, en general mediante consultas a pobladores y/o registros de alturas de inundación. En este primer paso, pueden ser considerados como suelos sin aptitud agrícola, aquellos que afectados por frecuentes inundaciones y/o encharcamientos que duran gran parte del año.

En caso que estos fenómenos no sean frecuentes, el segundo paso es evaluar la existencia o no de halomorfismo edáfico, en forma de niveles excesivos de sodio intercambiable y/o sales solubles. Es frecuente que los suelos que poseen este tipo de alteraciones de la fertilidad, también posean rasgos hidromórficos en alguna parte del perfil y que puedan ser afectados por anegamientos en meses de baja demanda por evapotranspiración. El princi-

pal criterio que se sigue con los problemas de halomorfismo e hidromorfismo es la profundidad a la cual se presentan en el perfil. Cuando los problemas son observados dentro de los primeros 40 cm del perfil, se considera que los suelos son no aptos para uso agrícola. Del mismo modo, y si bien la génesis del problema no es la misma, cuando un suelo presenta planchas de tosca dentro de esa profundidad (0 a 40), también se lo considera no agrícola, en esta caso por impedimentos mecánicos genéticos.

En caso que estas limitantes (halo-hidromorfismo o tosca) se presenten en profundidades entre 40 y 100 cm, el suelo puede ser apto para algunos cultivos con menos exigencias de profundidad efectiva. En este caso, estos suelos son clasificados como de aptitud parcial para el uso agrícola.

En caso que el suelo no sufra ninguna de las limitantes antedichas, el árbol de decisión conduce a evaluar si estamos en presencia de ambientes arenosos. Ello es así porque el diagnóstico de estos ambientes puede ser efectuado tanto a nivel de paisaje (imágenes, fotos, cartografía de suelos publicada por el INTA, observación *in situ*), como del perfil del suelo. Los ambientes arenosos poseen una gran variabilidad, dada principalmente por el grado de evolución de los suelos que los componen. Este grado de evolución se relaciona directamente con variables de su fertilidad. Un criterio de diferenciar estos suelos entre si es por la textura del horizonte A, y por la presencia o no de un horizonte B cámbico (Bw). Se propone que aquellos suelos que no poseen más de 10% de arcilla en ningún horizonte o capa dentro del metro, poseen limitaciones importantes de retención hídrica y pobre fertilidad, lo que los torna parcialmente aptos para cultivos agrícolas. En caso que el ambiente no sea arenoso, el árbol de decisión traslada a los suelos de sedimentos más finos, con texturas francas, franco limosos y franco arcillo limosas en superficie. En estos ambientes es importante saber diferenciarlos por tipo de relieve, en particular su pendiente si es mayor al 1%, pues es un claro indicador de riesgo de erosión. En caso que posea este tipo de relieve, es fundamental relevar la profundidad del horizonte A como un indicador de pérdida de suelo. Si este horizonte posee un espesor de menos de 10 cm sobre el horizonte subyacente, generalmente un BA o un Bt, es indicador de que el suelo se encuentra erosionado. En este punto es importante saber qué es lo que hay debajo del horizonte A. Si es un horizonte Bt pesado (textura franco arcillosa, arcillo limosa, arcillosa, y otras), se considera que es una limitante importante para la exploración radical, lo cual convierte al suelo en no agrícola. En caso que el horizonte que está por debajo del A erosionado tenga un porcentaje de arcilla menor al 45%, se considera que no representa un impedimento mecánico, por lo que el suelo posee aptitud de uso agrícola, previo análisis de diagnóstico de limitantes por acidez.

Ejemplos de diagnóstico de la capacidad productiva de un suelo

A modo de ejemplo de lo descrito en los párrafos anteriores, se presentan toposecuencias típicas de la Región Pampeana. Estos patrones se repiten en otras regiones del país, con algunos cambios en la ubicación taxonómica de los suelos. Se utilizan perfiles descritos en Salazar Lea Plaza y Moscatelli (1989) y en <http://www.inta.gov.ar/suelos/cartas/index.htm>. De esta última fuente tomamos los perfiles que presentamos a continuación a modo de ejemplo.

Pampa Ondulada

En las posiciones elevadas predominan Argiudoles Típicos. Son suelos profundos, de elevada potencialidad en su situación original. Actualmente presentan una marcada variabilidad de capacidad productiva, la que fue determinada por el uso agrícola y el grado de erosión. En áreas con pendiente, este último puede ser muy grave, no siendo infrecuentes situaciones donde todo el horizonte A original se ha perdido y el que aflora a la superficie es el horizonte B1 original. En esta zona se pueden distinguir tres áreas diferentes. La principal diferencia es el gradiente de contenido de arcilla en los horizontes subsuperficiales, el cual va aumentando hacia el este. En la zona central de la Pampa Ondulada (ej. Arrecifes) se presentan las mayores pendientes y el impacto de la erosión es muy marcado. En tal sentido, el registro de la profundidad a la que se encuentra el horizonte Bt es la principal herramienta para diagnosticar la situación actual del suelo. La porción este de la Pampa Ondulada (ej. Rojas) posee los suelos de mayor fertilidad. En las posiciones algo más deprimidas se presentan Argiudoles Acuicos, de menor productividad que los anteriores. En comparación con aquellos, el horizonte B2t se encuentra más próximo a la superficie. En épocas de lluvias intensas pueden presentar saturación por encima de este horizonte Bt lo que da lugar a moteados y concreciones en la base del horizonte A.

Siguiendo la toposecuencia en sentido descendente, se encuentran los Natracuoles. La principal limitante es la presencia de alcalinidad en el horizonte B2t. Esta es una limitante primaria que restringe drásticamente su capacidad productiva y su explotación agrícola. A escala de perfil, el horizonte A suele poseer buenas condiciones físicas para el desarrollo de las raíces. La alcalinidad del B se detecta fácilmente mediante mediciones de pH y la observación visual.

En posiciones más deprimidas se desarrollan los Natracualfes. En estos suelos la alcalinidad se presenta desde la superficie. El color del suelo es más claro que en los suelos anteriores, y la cobertura vegetal es baja. Dado que no se dedican a cultivo, la vegetación natural (en la que predomina muchas veces *Distichlis* spp. "pelo de chancho") normalmente tapiza estos suelos. Excepto los Argiudoles Típicos, los restantes suelos sufren anegamientos en períodos de grandes lluvias. La persistencia y magnitud de estos eventos aumenta hacia las posiciones más deprimidas del relieve.

Pampa Ondulada: Rojas

Toposecuencia en Rojas



Serie Rojas (Ro)

Es un suelo oscuro, profundo, bien provisto de materia orgánica y bien drenado, no alcalino, no salino. Se encuentra en las lomas planas y extendidas con gradiente de 0 a 1%, de la Subregión Pampa Ondulada. Se ha formado sobre sedimentos loésicos franco limosos.

Clasificación taxonómica: Argiudol Típico, Limosa fina, mixta, térmica. (USDA-Soil Taxonomy, 2006).

Datos Analíticos:

Horizontes	Ap1	Ap2	AB	Bts	Bt	BC	C	Ck
Profundidad (cm)	0-13	13-28	28-36	36-62	62-78	78-115	115-235	235-275
Carbono total (%)	1,77	1,77	1,00	0,44	0,33	0,23	0,13	NA
Nitrógeno (%)	0,172	0,173	0,115	0,040	0,038	0,030	NA	NA
Arcilla < 2 μ (%)	22,9	23,7	25,5	35,5	27,8	16,9	14,4	12,3
Limo 2-20 μ (%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Limo 2-50 μ (%)	49,4	46,8	48,3	39,0	42,0	43,8	46,6	52,3
Calcáreo (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,1
Eq.humedad (%)	21,8	22,1	22,5	25,8	23,3	15,9	14,2	14,6
pH H ₂ O 1:2,5	6,0	6,0	6,7	6,9	6,7	7,1	7,2	8,4
Na (% de T)	1,1	1,0	1,1	0,9	1,0	1,4	1,6	NA

Serie Wheelwright (Ww)

Es un suelo medianamente profundo degradado, de aptitud agrícola-ganadera, se encuentra en un paisaje de planicies, se ha desarrollado en las hoyas o áreas muy llanas de los planos extendidos del norte del Partido de Colón, en el noroeste de la hoja Pergamino, Subregión Pampa Ondulada alta, algo pobremente drenado, formado sobre sedimentos loesoides, franco limoso, con menos del 15% de sodio en superficie y alcalino sódico desde los 56 cm. de profundidad, no salino, con pendientes que no superan el 0.5%.

Clasificación taxonómica: Natralbol Típico, Fina, illítica, térmica (USDA- Soil Taxonomy, 2006).

Datos Analíticos:

Horizontes	Ap1	Ap2	E	Bts1	Bts2	BC	C
Profundidad (cm)	0-9	9-25	25-33	33-56	56-69	69-90	90-120
Carbono total (%)	2,71	0,65	0,53	0,41	0,31	0,14	0,04
Nitrógeno (%)	0,270	0,070	0,063	0,053	0,040	NA	NA
Arcilla < 2 μ (%)	23,3	22,6	17,3	40,1	32,3	30,3	23,1
Limo 2-20 μ (%)	-	-	-	-	-	-	-
Limo 2-50 μ (%)	58,8	60,7	67,1	50,3	50,7	54,1	55,8
Calcáreo (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	Vest	Vest	Vest
Eq.humedad (%)	25,4	24,0	20,2	36,5	32,0	30,3	25,2
Re.pasta.Ohms	-	-	-	-	-	-	-
Cond. mmhos/cm	-	-	-	-	-	-	-
pH H ₂ O 1:2,5	6,4	7,1	7,5	7,7	8,4	8,9	8,9
Na (% de T)	3	6	10	13	20	19	27

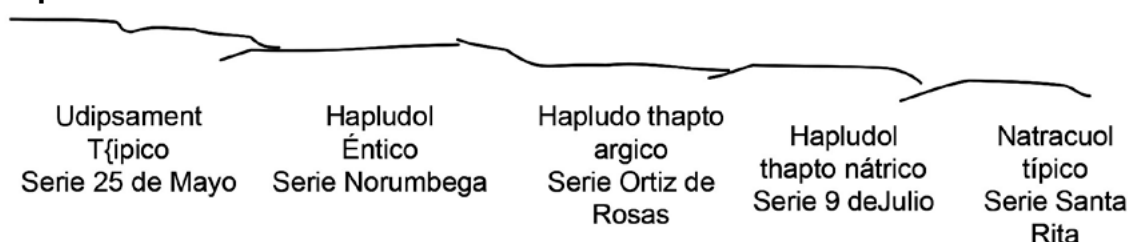
Pampa Arenosa

La mayor parte de los suelos del oeste de Buenos Aires son poligenéticos. Esto significa que en un mismo perfil se encuentran dos o más suelos superpuestos. En las posiciones elevadas se presentan Udipsaments, Hapludoles Enticos y Hapludoles Típicos. Las principales limitantes son la baja retención hídrica y la susceptibilidad a erosión, principalmente en épocas de sequía. Ambas limitantes son más marcadas en los Hapludoles Enticos.

En posiciones más bajas se desarrollan los Hapludoles Thapto-árgicos y los Hapludoles Thapto-nátricos. En épocas húmedas, la ausencia de una red de drenaje natural y la presencia de capas freáticas altas determinan una limitación a la productividad por hidromorfismo. En épocas de escasas precipitaciones, la principal limitante la constituye la escasa retención hídrica. El gradiente de productividad de estos ambientes se determina por la presencia de alcalinidad en el IIB2t, que permite diferenciar entre los subgrupos Thapto árgico y Thapto nátrico. En las depresiones evolucionan los Natracuoles y los Natracualfes, alcalinos e hidromórficos, en los que periódicamente se acumula agua. En las regiones menos húmedas del Oeste Bonaerense se pueden encontrar Ustipsaments en las posiciones topográficas más positivas y Salortides en las deprimidas, ambos con características más extremas que los suelos descriptos aquí.

Pampa Arenosa: Carlos Casares

Toposecuencia en Carlos Casares



Serie Veinticinco de Mayo (VMy)

Es un suelo pardo oscuro, profundo, poco desarrollado, de aptitud ganadera, se encuentra en un paisaje de cordones arenosos ondulados, en posición de cresta de loma, en la Subregión Pampa Arenosa, excesivamente drenado, no alcalino, no salino, con pendientes de 1%.

Clasificación taxonómica: Udipsament Típico, Arenosa, mixta, térmica (USDA- Soil Taxonomy, 2006).

Datos Analíticos:

Horizontes	A	AC	C
Profundidad (cm)	0-25	25-55	55-120
Carbono total (%)	0,32	0,26	0,10
Nitrógeno (%)	0,063	S/D	S/D
Arcilla < 2 μ (%)	7,6	6,6	6,4
Limo 2-20 μ (%)	3,2	4,5	2,0
Limo 2-50 μ (%)	5,4	8,3	4,0
Calcáreo (%)	0	0	0
Eq.humedad (%)	6,1	6,8	5,3
pH H ₂ O 1:2,5	7,0	7,0	7,4
Na (% de T)	0,7	1,3	2,9

Serie Norumbega (No)

Es un suelo profundo, arenoso, con escaso desarrollo, de aptitud agrícola que se encuentra en un paisaje de cordones medianosos con relieve suavemente ondulado, en posición de crestas de lomas y medias lomas de la Subregión Pampa Arenosa, algo excesivamente drenado, habiendo evolucionado sobre sedimentos eólico arenosos, no alcalino, no salino con pendiente predominante de 1%.

Clasificación taxonómica: Hapludol Entico, Franca gruesa; mixta, térmica (USDA- Soil Taxonomy, 2006).

Datos Analíticos:

Horizontes	A	AC	C
Profundidad (cm)	0-25	25-50	50-100
Carbono total (%)	1,32	0,50	0,24
Nitrógeno (%)	0,126	0,055	NA
Arcilla < 2 μ (%)	14,7	15,6	13,5
Fósforo (PPM)	4,6	1,9	2,5
Limo 2-20 μ (%)	9,1	7,8	5,9
Limo 2-50 μ (%)	20,1	19,3	15,3
Calcáreo (%)	NA	NA	NA
Eq.humedad (%)	15,2	16,7	11,3
Na (% de T)	1,5	4,7	1,7
pH H ₂ O 1:2,5	6,5	6,9	6,5

Serie Ortiz de Rosas (Or)

Es un suelo oscuro, profundo de aptitud agrícola, se encuentra en un paisaje suavemente ondulado de la Región Pampa Arenosa, en posición de loma, moderadamente bien drenado, poli-genético formado por una acumulación de un material arenoso, que sepulta un B textural formado en un sedimento mas antiguo de textura franco arcillo arenoso, no alcalino, no salino, con pendientes de 1%.

Clasificación taxonómica: Hapludol Thapto Argico, Franca fina, mixta, térmica (Adaptación de la clasificación de los suelos argentinos al S.T. 1975).

Datos Analíticos:

Horizontes	Ap	A	AC	Bts	BC	Ck
Profundidad (cm)	0-23	23-35	35-55	55-73	73-110	110-120
Carbono total (%)	1,44	1,28	0,26	0,22	0,15	0,07
Nitrógeno (%)	0,135	0,119	NA	NA	NA	NA
Arcilla < 2 μ (%)	14,9	17,3	13,3	29,5	25,1	21,0
Limo 2-20 μ (%)	20,6	18,4	14,7	12,2	8,8	19,2
Limo 2-50 μ (%)	35,9	36,8	29,4	23,3	21,2	31,8
Calcáreo (%)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Eq.humedad (%)	15,2	20,5	14,9	24,7	22,9	24,7
Re. pasta Ohms	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Cond. mmhos/cm	NA	NA	NA	NA	NA	NA
pH en pasta	5,8	5,9	6,3	6,3	7,2	7,8

Serie Nueve de Julio (NJ)

Es un suelo pardo grisáceo, profundo, de aptitud ganadero-agrícola, se encuentra en un paisaje plano-bajo con micro-elevaciones, en la Subregión Pampa Arenosa, en posición de micro-loma, algo pobremente drenado, poli-genético formado por una acumulación de material franco arenoso de 80 cm. de espesor, que sepulta un B textural alcalino sódico, sedimento más antiguo, de textura franco arcillo arenoso, alcalino a partir de los 80 cm. de profundidad, débilmente salino desde los 95 cm, con pendientes de 0,5%.

Clasificación taxonómica: Hapludol Thapto Nátrico, Franca gruesa, mixta, térmica (sin ubicación en el USDA- Soil Taxonomy, 2006). Adaptación en la clasificación de los suelos argentinos (Mapas-INTA).

Datos Analíticos:

Horizontes	A1/A2	ACc	Btc	BC	C
Profundidad (cm)	0-58	58-80	80-95	95-110	110-120
Carbono total (%)	1,56	0,36	0,15	0,06	0,05
Nitrógeno (%)	0,150	0,035	NA	NA	NA
Arcilla < 2 μ (%)	10,5	8,6	15,7	14,8	19,3
Limo 2-20 μ (%)	10,5	10,3	8,3	8,6	6,6
Limo 2-50 μ (%)	28,5	26,5	24,6	22,8	20,6
Calcáreo (%)	NA	NA	NA	NA	NA
Eq.humedad (%)	15,3	10,8	20,0	16,9	22,0
pH H ₂ O 1:2,5	6,5	6,0	9,5	9,5	9,6
Na (% de T)	2,3	9,1	44,0	60,0	58,0

Serie Santa Rita (SRi)

Es un suelo gris oscuro, moderadamente profundo, de aptitud ganadera, se encuentra en un paisaje de planicies bajas, en posición de bajo, en la Subregión Pampa Arenosa, pobremente drenado, formado sobre sedimentos arenosos, fuertemente alcalino-sódico desde la superficie, salino, con pendientes de 0 a 0,5%.

Clasificación taxonómica: Natracuol Típico, Franca fina, mixta, térmica

Datos Analíticos:

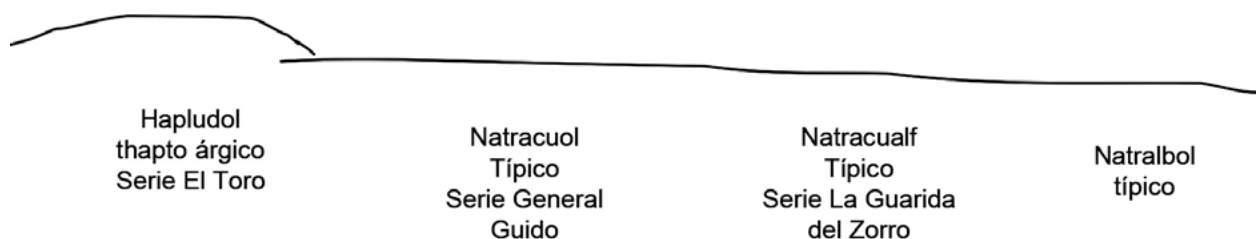
Horizontes	An	En	2Btzn1	2Btzn2	3BCnz
Profundidad (cm)	0-15	23-38	42-48	53-60	65-80
Carbono total (%)	0,82	0,39	0,27	0,25	0,02
Nitrógeno (%)	0,079	0,044	NA	NA	NA
Arcilla < 2 μ (%)	9,7	8,8	32,6	28,3	10,2
Limo 2-20 μ (%)	NA	NA	NA	NA	NA
Limo 2-50 μ (%)	24,8	27,4	10,1	14,7	14,8
Calcáreo (%)	Vestigios	Vestigios	0,6	9,8	Vestigios
Eq.humedad (%)	18,9	16,7	53,0	44,8	15,6
Cond. mmhos/cm	NA	NA	3,25	7,90	3,55
pH en pasta	9,8	9,6	9,8	9,8	9,8
Na (% de T)	68	70	70	70	92

Pampa Deprimida

El área se caracteriza por ser una extensa planicie con muy bajo escurrimiento superficial y capas de agua subterránea cercanas a la superficie. Predominan amplios bajos tendidos que pueden ocupar decenas de kilómetros de longitud ocupados por Natracuoles con alcalinidad subsuperficial y con periódicos ascensos de sales a la superficie por capilaridad. Estos ambientes están sujetos a anegamientos temporales. La forma más simple de reconocer estos suelos es evaluar su posición en el paisaje y por sobre todo la alcalinidad del horizonte superficial. En posiciones topográficas mas deprimidas se encuentran Natracualfes, caracterizados por alcalinidad desde la superficie y vegetación dominada por *Distichlis* spp. Estos suelos se encuentran en planicies extendidas anegables o en anillos que rodean depresiones con anegamiento mas prolongado. Su horizonte superficial es de color claro y se presenta un gran porcentaje de suelo desnudo. En planos bajos tambien encontramos Natralboles, normalmente formando un intrincado patrón con Natracuoles y Natracualfes. En lomas que se distinguen del nivel general encontramos Hapludoles Thapto-árgicos. Estos ambientes se utilizan para instalar viviendas, construcciones rurales, montes y dormitorios de hacienda.

Pampa Deprimida: Las Flores

Toposecuencia en Las Flores



Serie el Toro (Eto)

Es un suelo pardo oscuro, profundo, de aptitud agrícola, que se encuentra en un paisaje de amplias planicies suavemente onduladas de la Subregión Pampa deprimida sector oriental, en posición de loma baja, moderadamente bien drenado, poligenético, desarrollado sobre materiales originarios de dos ciclos con sedimentación eólica, el actual y el antiguo (B) con moderado grado de desarrollo, no alcalino, no salino, con pendientes de 0,5-1%.

Clasificación taxonómica: Hapludol Thapto Argico, Limosa fina, mixta, térmica (Adaptación de la clasificación de los suelos argentinos al S.T. 2006).

Datos analíticos:

Horizontes	A	AC	2Bts	2BCc	2C
Profundidad (cm)	10-30	45-65	70-90	105-150	150-170
Carbono total (%)	2,08	0,20	S/D	S/D	S/D
Nitrógeno (%)	0,172	S/D	S/D	S/D	S/D
Arcilla < 2 μ (%)	21,6	12,0	28,6	22,7	21,6
Limo 2-20 μ (%)	13,1	8,3	7,6	6,7	14,6
Limo 2-50 μ (%)	21,5	17,5	16,1	15,5	26,5
Calcáreo (%)	NA	NA	NA	NA	0,2
Eq.humedad (%)	17,9	7,4	22,2	16,2	21,2
Cond. mmhos/cm	NA	NA	NA	NA	NA
pH 1 2.5	5,9	7,0	7,5	7,6	9,0
Na (% de T)	1,9	2,5	3,2	2,7	10,0

Serie General Guido (GG)

Es un suelo gris muy oscuro, profundo, con aptitud ganadera que se encuentran en los tendidos de la Subregión Pampa Deprimida Sector Oriental, algo pobremente drenado, con rasgos hidromórficos, desarrollado sobre sedimentos finos, no salino a débilmente salino, con fuerte alcalinidad sódica desde los 14 cm. de profundidad con pendientes que no superan el 0-0,5%.

Clasificación taxonómica: Natracuol Típico, Fina, illítica, térmica (USDA- Soil Taxonomy, 2006).

Datos analíticos:

Horizontes	A	Btcn	Btcnk	BCnk1	BCnk2	Cnk
Profundidad (cm)	0-14	14-34	34-52	52-90	90-130	130 a +
Carbono total (%)	2,44	0,68	0,46	0,14	0,02	0,02
Nitrógeno (%)	0,256	0,108	0,046	NA	NA	NA
Arcilla < 2 μ (%)	25,7	57,5	38,9	25,5	19,6	20,6
Limo 2-20 μ (%)	16,8	9,7	12,7	18,2	15,9	16,1
Limo 2-50 μ (%)	40,0	27,2	33,8	39,6	42,2	39,9
Calcáreo (%)	0	0	2,5	5,5	Vest	4,5
Eq.humedad (%)	36,1	74,4	38,4	30,5	26,0	29,9
Cond. mmhos/cm	NA	2,47	3,85	NA	NA	NA
pH en pasta	6,8	8,2	8,4	8,3	8,3	8,3
pH H2O 1:2,5	7,3	8,9	9,1	9,0	9,1	9,1
Na (% de T)	10	32	33	27	17	16

Serie la Guardia del Zorro (LGZ)

Es un suelo pardo grisáceo, profundo, de aptitud ganadera, se encuentra en un paisaje de planicies bajas, en relieve subnormal-cóncavo, en posición de bajo, en la Subregión Pampa Deprimida Sector Oriental, muy pobremente drenado, formado en sedimentos loésicos, con fuerte alcalinidad desde la superficie y es moderadamente salino.

Clasificación taxonómica: Natracualfs Típico, Fina, illítica, térmica (USDA- Soil Taxonomy, 2006).

Datos analíticos:

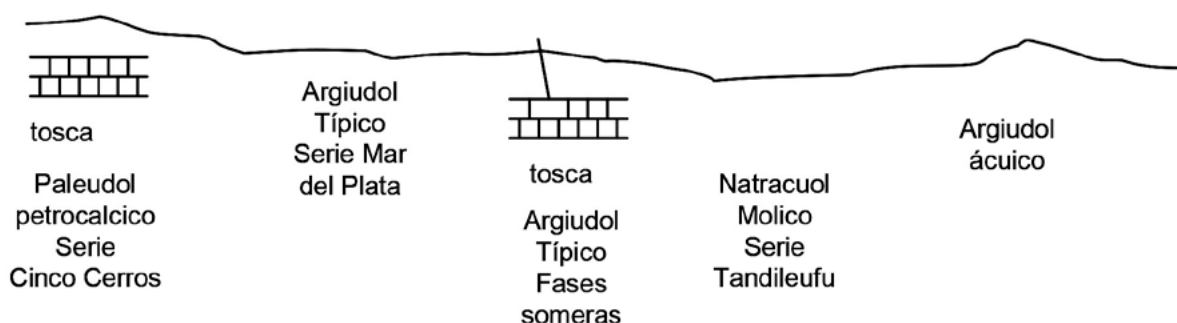
Horizontes	An	Btnz	BCknm	Ckn
Profundidad (cm)	5-12	25-45	60-80	80-130
Carbono total (%)	0,61	0,43	NA	NA
Nitrógeno (%)	0,079	0,054	NA	NA
Relación C/N	7,72	7,96	NA	NA
Arcilla < 2 μ (%)	18,4	50,7	20,5	23,3
Limo 2-20 μ (%)	18,9	9,3	18,3	29,1
Limo 2-50 μ (%)	36,0	17,5	40,5	49,1
Calcáreo (%)	0	4,4	3,5	8,4
Eq.humedad (%)	20,9	67,9	30,0	37,0
Cond. mmhos/cm	0	3,57	1,27	0
pH 1 2.5	9,2	10,1	9,8	9,5
Na (% de T)	25	51	37	37

Sudeste de Buenos Aires

Gran parte de los suelos de la región se asientan sobre un manto de material calcáreo (tosca), que aflora a la superficie en algunos sectores. Los Argiudoles Típicos que predominan en los sectores elevados presentan un gradiente de productividad determinado principalmente por la presencia y la profundidad de la tosca. A mayor profundidad de la tosca, mayor capacidad productiva. La presencia de tosca no suele tener un patrón definido con la posición topográfica. En cubetas y áreas anegables, se encuentran Natracuoles y Natracualfes. En posiciones intermedias o áreas no deprimidas pero con problemas de drenaje evolucionan Argiudoles Acuicos. Estos son menos profundos que los Argiudoles Típicos y presentan rasgos de hidromorfismo marcados en todo el horizonte B.

Sudeste de Buenos Aires: Lobería

Toposecuencia en Loberia



Serie Cinco Cerros (CC)

Es un suelo oscuro, poco profundo y de aptitud agrícola, se encuentra en un paisaje de lomas moderadamente onduladas, pronunciadas, en posición de loma y pendiente de la Subregión Pampa Austral Interserrana, bien drenado, formado en sedimentos loésicos finos, no alcalino, no salino con pendiente 1-10%.

Clasificación taxonómica: Paleudol Petrocálcico, Fina, illítica, somera, térmica (USDA- Soil Taxonomy, 2006).

Datos analíticos:

Horizontes	Ap	Bts	2Ckkm
Profundidad (cm)	0-23	23-45	45 a +
Carbono total (%)	3,50	1,53	NA
Nitrógeno (%)	0,320	0,153	NA
Arcilla < 2 μ (%)	30,7	41,8	NA
Limo 2-20 μ (%)	15,1	10,6	NA
Limo 2-50 μ (%)	30,9	24,9	NA
Calcáreo (%)	S/D	0,1	NA
Eq.humedad (%)	27,9	31,3	NA
pH 1 2.5	5.8	6,5	NA
Na (% de T)	2,56	2,51	NA

Serie Mar del Plata (MP)

Es un suelo oscuro, profundo, con fuerte desarrollo, su aptitud es agrícola, se encuentra en un área de paisaje serrano en posición de loma y pendiente dentro de la Subregión Pampa Austral Interserrana, bien drenado, desarrollado sobre sedimentos loésicos franco limosos, no salino, no alcalino, en pendientes de 1 a 3%.

Suelos asociados: Azul, Tandil, La Alianza, Semillero Book, Necochea, Lobería, Mechongué, Sierra de los Padres, Balcarce, Mar del Plata, Tandil, La Malacara, Chocorí, Napaloeofú, Olavarría

Clasificación taxonómica: Argiudol Típico, Limosa fina, mixta, muy profunda, térmica. (USDA- Soil Taxonomy, 2006).

Datos analíticos:

Horizontes	Ap	A	AB	Bt1	Bt2	BC	C
Profundidad (cm)	3-9	22-28	29-31	45-50	65-70	85-91	128-150
Carbono total (%)	4,03	3,06	1,74	1,36	0,58	0,29	0,04
Nitrógeno (%)	0,342	0,249	0,151	0,119	0,068	NA	NA
Arcilla < 2 μ (%)	23,1	22,4	23,6	33,3	31,4	19,6	13,7
Limo 2-20 μ (%)	13,4	12,7	13,5	14,1	16,9	11,2	7,8
Limo 2-50 μ (%)	35,8	33,6	36,3	29,2	34,4	31,3	33,4
Calcáreo (%)	0	0	0	0	0	0	0
Eq.humedad (%)	30,1	28,8	39,8	37,8	37,5	23,6	15,8
Re. pasta Ohms	2958	3654	3480	2784	2610	4045	6090
pH H2O 1:2,5	5,9	6,1	6,3	6,7	7,0	7,2	7,6
Na (% de T)	1,26	1,78	1,74	1,98	2,82	2,74	3,97

Serie Tandileofu (Tdf)

Es un suelo profundo, de aptitud ganadera, que se encuentra en una planicie baja de áreas deprimidas, próximo a los cursos de arroyos y bajos de la Subregión Pampa Deprimida Oriental, transición a la Subregión de Sierra y Pedemonte de Tandilia, en posición de bajo, pobremente drenado, evolucionado sobre sedimentos limosos fluvio lacustres, palustres, fuerte alcalinidad y leve salinidad después de los 26 cm. de profundidad, con pendientes de 0 a 0.5%.

Clasificación taxonómica: Natracualf Mólico, Fina, illítica, muy profunda, térmica (USDA-Soil Taxonomy V.2010).

Datos analíticos:

Horizontes	A	Ecn	2Btsn1	2Btsn2	2BCn	3Ckn1	3Ckn2
Profundidad (cm)	5-12	16-21	26-53	58-76	80-120	130-155	160-165
Carbono total (%)	2,97	0,48	0,46	0,19	0,13	NA	NA
Nitrógeno (%)	0,304	0,053	0,050	NA	NA	NA	NA
Arcilla < 2 μ (%)	22,2	17,3	54,3	45,9	36,9	24,4	NA
Limo 2-20 μ (%)	25,5	24,8	12,7	18,9	23,0	21,4	NA
Limo 2-50 μ (%)	45,9	47,7	25,5	28,2	37,0	41,7	NA
Calcáreo (%)	0	0	Vestigios	0,4	Vestigios	1,6	40,8
Eq.humedad (%)	24,8	20,4	60,7	45,8	41,0	30,8	31,5
Cond. mmhos/cm	NA	NA	1,82	1,19	NA	NA	NA
pH 1 2.5	6,1	7,5	9,2	9,4	8,9	9,1	8,9
Na (% de T)	5,2	10,8	21,0	24,0	23,0	52,0	NA

Bibliografía

- BASE DE DATOS DE SUELOS EN LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES, 2016. <http://www.inta.gov.ar/suelos/cartas/index.htm> (INTA Instituto de Suelos, Castelar, BA).
- RUBIO G, MA TABOADA. 2013 Arbol de decisión para diagnosticar la capacidad productiva de suelos de la región pampeana. *Ciencia del Suelo* 31:235-243
- SALAZAR LEA PLAZA JC, G MOSCATELLI. 1989. Mapa de Suelos de la Provincia de Buenos Aires. Escala 1:500 000. SAGyP, INTA, Buenos Aires.
- USDA. 2006. United State of Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_052172.pdf
- USDA. 2010. United State of Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. USDA. 2006. United State of Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_052172.pdf

MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO

Helena Rimski-Korsakov y Carina R. Álvarez

Los componentes orgánicos presentes en el suelo están formados por estructuras variadas y de diferente complejidad (Figura 1). Dentro de ellas se encuentran los residuos vegetales y animales, los organismos vivos (macro y mesofauna edáfica y la biomasa microbiana -hongos y bacterias-) y la fracción orgánica que ha sufrido transformaciones (humificación) y presenta estructuras complejas. En el presente capítulo nos referiremos a la materia orgánica (MO) como la fracción conformada por los microorganismos edáficos y la fracción orgánica humificada. A la vez, la fracción humificada puede ser dividida según su labilidad o resistencia a la degradación microbiana. Existen diferentes metodologías para separar la fracción lábil de la más resistente. Dos de ellas son: la separación por densidad en materia orgánica liviana (<2 g/ml) y pesada (>2 g/ml) o por tamizado, materia orgánica gruesa o particulada (> 53µm) y fina (< 53 µm)

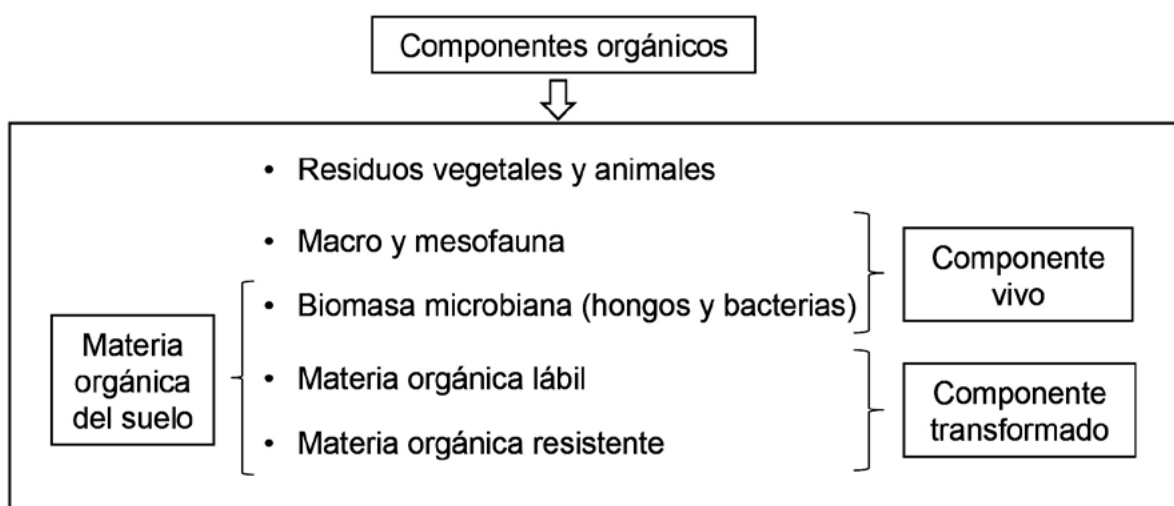


Figura 1. Componentes orgánicos presentes en el suelo.

Importancia de la materia orgánica

La MO cumple una serie importante de funciones en el suelo y ambiente. Influye de manera directa e indirecta sobre numerosas propiedades químicas, físicas, biológicas y ambientales.

Dentro de las propiedades químicas se destaca como reservorio de nutrientes. Por un lado, en ella se encuentra el 98% del nitrógeno y azufre, y del 30 al 50% del fósforo del

suelo. Estos nutrientes no están inmediatamente disponibles para las plantas. Para que dichos nutrientes estén disponibles la MO debe mineralizarse. Por otro lado, incrementa la capacidad de intercambio catiónico, aumentando así la cantidad de nutrientes adsorbidos en el suelo.

A la vez, la MO tiene un fuerte rol en las propiedades físicas del suelo. Suelos con mayores contenidos de MO poseen mayor estabilidad estructural. Por lo tanto, son suelos con menor susceptibilidad de degradarse ante disturbios mecánicos (por maquinaria o por lluvias y vientos). También existe un efecto benéfico al disminuir la densidad aparente (Figura 2) y aumentar la capacidad de retención hídrica.

Ambientalmente la MO cumple un rol importante al actuar sobre el secuestro de carbono atmosférico. De esta forma disminuye el CO_2 en la atmósfera, atenuando el efecto invernadero.

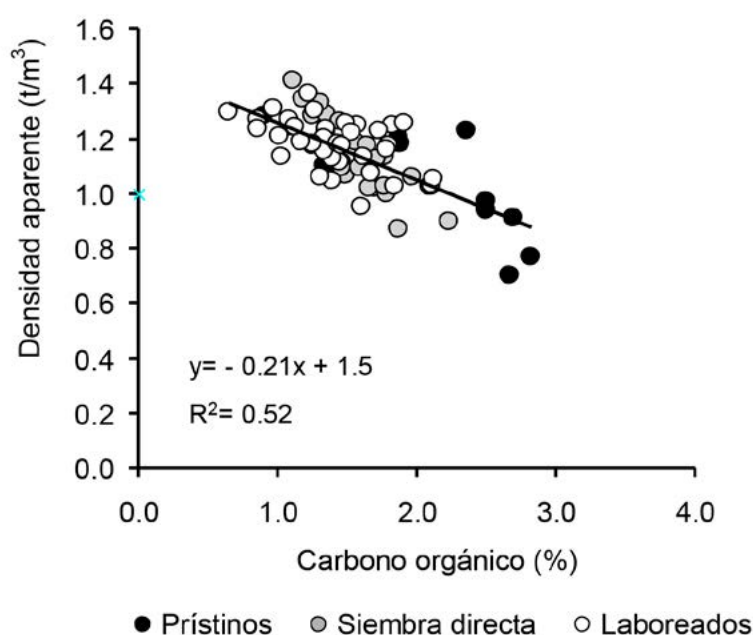


Figura 2. Relación entre la densidad aparente del suelo y el carbono orgánico en suelos de la Pampa Ondulada bajo distintos sistemas de manejo (Álvarez *et al.*, 2012).

Ciclo del carbono

El ciclo del carbono del suelo (Figura 3) está conformado por una serie de procesos que comprenden entradas, salidas y transformaciones de dicho elemento. Las entradas de C al suelo son los residuos vegetales y animales, y los abonos orgánicos. En producciones extensivas los abonos orgánicos no son una práctica común. Esto se debe a los grandes volúmenes que se requerirían por las mayores superficies utilizadas, en relación a las producciones intensivas. Una parte de los residuos, mediante el proceso de humificación, pasa a formar parte de la materia orgánica del suelo. Otra parte de los mismos, son utilizados directamente como fuente de energía por los microorganismos y se libera CO_2 a la atmósfera (proceso de descomposición). Este proceso no es una pérdida de C del suelo, ya que se libera a partir de los residuos que aún no se humificaron. Por otro lado, la principal pérdida de C del suelo es la mineralización. En dicho proceso, al igual que en el de descomposición, los microorganismos utilizan al C de la MO como fuente energética, liberando CO_2 a la at-

mósfera por su respiración. Si bien estos dos procesos, mineralización y descomposición, poseen un patrón común (respiración de los microorganismos) la tasa a la que se producen varía sustancialmente. La tasa de mineralización anual ronda el 5.7% de la MO, mientras que la de descomposición de residuos vegetales es del 50% para la Pampa Ondulada (Álvarez *et al.*, 2016). Esto significa que anualmente el 5.7% del C presente en la MO se perderá a la atmósfera como CO₂. La diferencia entre las tasas de los dos procesos se debe a la complejidad de las moléculas carbonadas que los componen y al grado de protección física. Mientras que los residuos vegetales presentan cadenas carbonadas sencillas, la MO presenta estructuras de gran complejidad y se hallan protegidas por los coloides del suelo o en agregados (protección física).

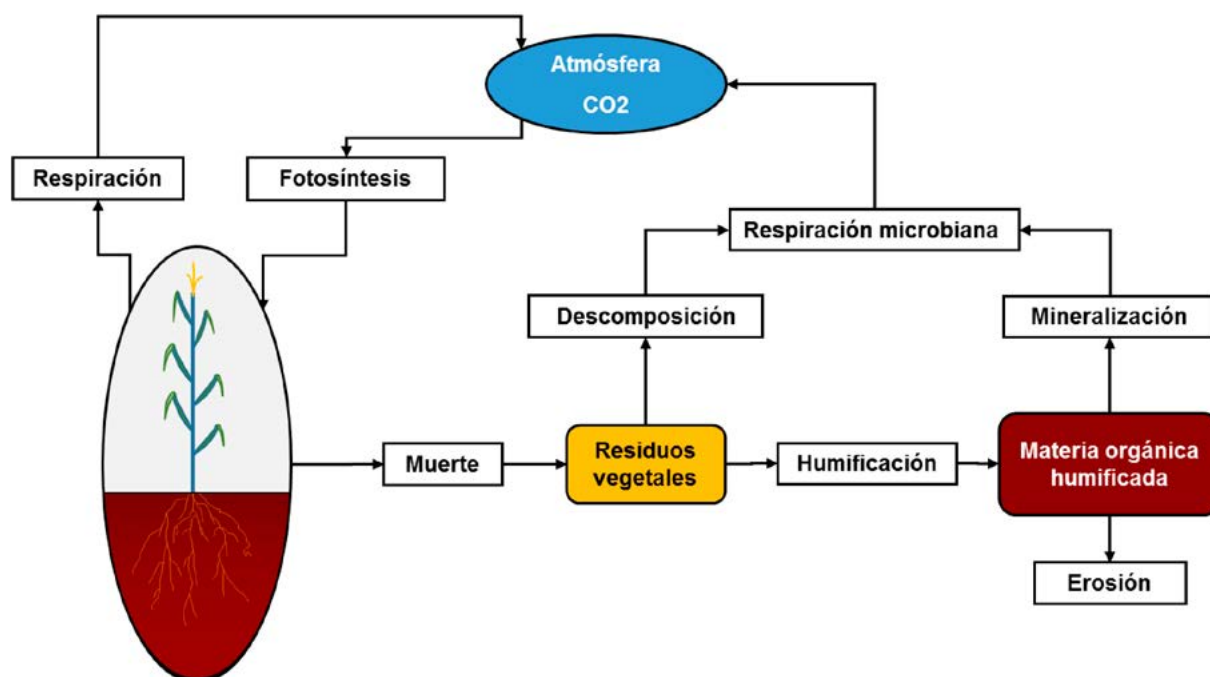


Figura 3. Ciclo de carbono del suelo en un sistema de producción vegetal extensivo. En el ganadero se agrega el aporte por excretas animales y en sistemas intensivos la adición de abonos orgánicos.

La erosión puede ser una vía de salida o entrada de MO, dependiendo la posición topográfica. Si existe erosión, las zonas altas pierden MO y las bajas la ganan. Obviamente, la erosión debería estar minimizada en los sistemas de producción. Si existe riesgo de erosión deben aplicarse las prácticas que tiendan a su control.

En resumen, las vías de entrada del C al suelo son los residuos vegetales y animales, y los abonos orgánicos. La salida está dada por la mineralización. La erosión puede encuadrarse en cualquiera de las opciones según la posición en el terreno.

Contenido y distribución regional de la materia orgánica

La MO representa una pequeña fracción del suelo. Este contenido varía según la región geográfica, pero no suele superar el 8% de la masa del suelo de 0-20 cm de profundidad (Sainz Rozas *et al.*, 2011, Figura 3). A la vez, el principal compuesto de la materia orgánica es el carbono (C). El 58% de la MO es C. Este nivel es bastante estable, por lo que es común referirse a la MO como C orgánico (CO) y viceversa, utilizando el coeficiente de conversión entre ambos.

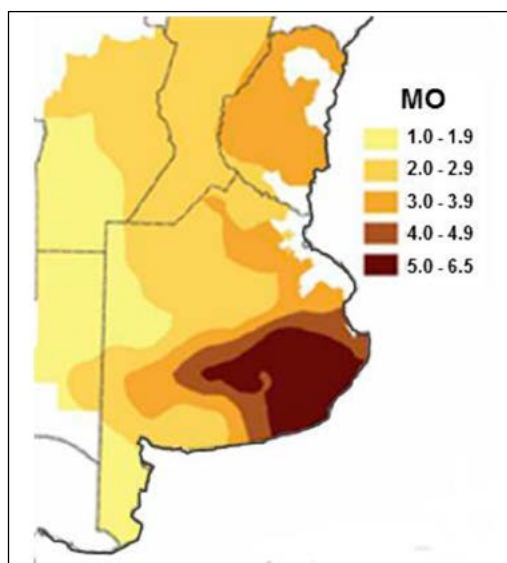


Figura 3. Distribución de la materia orgánica en suelos de la región pampeana (extraído de Sainz Rozas *et al.*, 2011).

Los contenidos de MO son el resultado del balance de entre las entradas y salidas de C del suelo. A la vez, las entradas y salidas están reguladas por cuestiones ambientales y de manejo. Los contenidos de MO originales de los suelos, antes de la intervención antrópica, se encontraban determinados por el aporte de los residuos vegetales autóctonos y las salidas por mineralización. Las precipitaciones y la temperatura, incrementan la producción de biomasa vegetal. Por lo tanto, los ingresos de C al suelo son mayores en zonas con mayores precipitaciones y temperaturas. En promedio, el peso seco de los residuos vegetales está formado en un 40% por C. Por otro lado, el efecto de la temperatura tiene un peso mayor sobre la actividad microbiana, aumentando las pérdidas de C por mineralización. La textura del suelo también afecta al balance de C. A igualdad de condiciones, suelos con texturas más arcillosas tendrán mayores niveles de MO. La textura actúa sobre la mineralización y sobre los ingresos de C. Suelos con texturas más gruesas tienden a tener menor capacidad de retención hídrica y, por lo tanto, menor productividad. Por otro lado, suelos con mayores contenidos de arcillas presentan menores tasas de mineralización, por la formación de complejos húmicos-arcillosos que dificultan el ataque de los microorganismos. Por todo lo anterior, se explica que los niveles de MO sean mayores hacia el este y el sur de la región pampeana (Figura 3; Tabla 1). En conclusión, es importante considerar que no hay un nivel de materia orgánica de referencia general, sino que depende de cada región según sus características edafo-climáticas.

Tabla 1. Valores promedio de materia orgánica y desvío estándar de 0-20 cm en condiciones originales (Sainz Rozas *et al.*, 2011).

Zona	Materia orgánica de 0-20 cm (%)	
	Promedio	Desvío
SE de Buenos Aires	8.6	1.8
N de Buenos Aires	5.0	1.0
S de Santa Fe	4.3	1.1
SE Córdoba	3.3	0.8
La Pampa	3.4	0.7

Determinación del contenido de materia orgánica del suelo

El contenido de MO del suelo se determina a través de un análisis de laboratorio. Los valores de referencia para comparar y diagnosticar el nivel de materia orgánica, dependen de las condiciones edafoclimáticas. En la Tabla 2 se presentan los datos de numerosos análisis realizados en el país que sirven como valores orientativos que abarcan tanto condiciones prístinas como cultivadas.

Tabla 2. Contenido de materia orgánica de 0-20 cm de muestras de la región pampeana y extra-pampeanas. Se brindan los valores mínimos, máximos y percentiles (Sainz Rozas *et al.*, 2011).

Provincia	Número de muestras	Materia orgánica de 0-20 cm (%)					
		Promedio	Mínimo	Máximo	0.25	0.5	0.75
Buenos Aires	19842	2.7	0.07	8.3	1.9	2.5	3.2
La Pampa	1122	1.6	0.5	5.2	1.2	1.5	1.9
Santa Fe	4439	2.7	0.5	6.5	2.3	2.7	3.0
Córdoba	3895	2.0	0.3	5.5	1.5	2.1	2.5
Santiago del Estero	220	2.5	1.6	5.0	2.2	2.4	2.6
Entre Ríos	1087	3.4	1.0	7.7	2.8	3.3	3.9
Salta	373	2.4	0.9	5.8	2.1	2.3	2.6
Tucumán	641	2.6	0.4	5.9	2.3	2.6	2.9

El muestreo de suelo se realiza, en general, hasta una profundidad de 20 ó 30 cm. Este parámetro requiere de una serie de años con determinados manejos para variar su contenido. Al no variar de un año a otro, no es necesario realizar el muestreo todos los años. Se recomienda muestrear cada 2 a 4 años, dependiendo de los cambios de manejos realizados. A la vez, al no ser un valor que varíe a lo largo del año, el muestreo puede realizarse en cualquier momento.

Las muestras son enviadas al laboratorio para su análisis, sin requerir estar refrigeradas.

Los resultados que devolverá el laboratorio estarán expresados en las siguientes unidades: % o g/kg suelo. A la vez, en ambos casos puede utilizarse en forma indistinta como MO o CO. Para transformar un valor en el otro debe conocerse que el contenido de C en la MO es de 58%.

Para conocer el contenido de MO o CO en masa, debe conocerse la densidad aparente del suelo.

A continuación se brindan una serie de ejemplo de transformación de valores de concentración a masa de MO o CO:

- Calcule la masa de MO y CO (t/ha) de las siguientes situaciones:
 - Datos: MO = 3%
Profundidad = 0 a 0.2 m
Densidad aparente suelo (0 a 20 cm) = 1.25 t suelo/m³

$$\text{Peso capa (t/ha)} = 10000 \text{ m}^2/\text{ha} * 0.2 \text{ m} * 1.25 \text{ t suelo/m}^3 = 2500 \text{ t suelo/ha}$$

$$\text{MO (t/ha)} = 2500 \text{ t suelo/ha} * 3/100 = \mathbf{75 \text{ t MO/ha}}$$

$$\text{CO (t/ha)} = 75 \text{ t MO/ha} * 58/100 = \mathbf{43.5 \text{ t CO/ha}}$$

- Datos: MO = 45 g/kg suelo

Profundidad = 0 a 0.2 m

Densidad aparente suelo (0 a 20 cm) = 1.25 t suelo/m³

Peso capa de suelo (t/ha) = 2500 t suelo/ha

MO (t/ha) = 2500 t suelo/ha * 45 g MO/1000 g suelo = **112.5 t MO/ha**

CO (t/ha) = 112.5 t MO/ha * 58/100 = **65.25 t CO/ha**

c) Datos: CO = 1.2%

Profundidad = 0 a 0.2 m

Densidad aparente suelo (0 a 20 cm) = 1.25 t suelo/m³

Peso capa de suelo (t/ha) = 2500 t suelo/ha

CO (t/ha) = 2500 t suelo/ha * 1.2/100 = **30 t CO/ha**

MO (t/ha) = 30 t C/ha / (58/100) = 30 t CO/ha * 1.72 = **51.72 t C/ha**

Impacto del manejo sobre el contenido de materia orgánica del suelo

Los contenidos originales de materia orgánica han ido variando en el tiempo por la acción antrópica. Al sustituir la vegetación natural con planteos productivos, se modificaron los ingresos y las salidas de CO de los suelos. Ante planteos productivos agrícolas se redujo el ingreso de residuos vegetales, se produjo un aumento de la mineralización (aumento de temperatura y disminución de la protección física de la materia orgánica por laboreo) y se incrementó el riesgo de erosión. En la región pampeana se han determinado pérdidas promedio del 16 a 40%, dependiendo la profundidad de muestreo considerada según distintos autores (Sainz Rozas *et al.*, 2011; Berhongaray *et al.*, 2013).

El hombre puede cambiar u operar favorablemente sobre el balance de C del suelo aumentando las entradas y/o disminuyendo las salidas.

Las formas de incrementar las entradas se basan en estrategias que incrementan los aportes de residuos al suelo o bien con la incorporación de abonos orgánicos. El aumento del aporte de residuos se logra incrementando la intensidad de cultivos por campaña, por ejemplo, con la rotación trigo/soja de segunda (dos cultivos al año). Otra opción es realizar cultivos de cobertura entre los cultivos principales. Si los cultivos de cobertura poseen especies de la familia de leguminosas, tienen el beneficio adicional de incorporar N atmosférico al suelo. También se pueden incrementar las entradas, seleccionando cultivos que dejen mayores volúmenes de rastrojos. Por ejemplo, los cultivos de maíz y sorgo se caracterizan por aportar grandes volúmenes de residuos, en relación al cultivo de soja. En la Figura 4 se presentan los aportes medios de rastrojos en la Pampa Ondulada para distintos cultivos (Cordone *et al.*, 1993, 1996).

Medir la masa de los residuos vegetales que llegan al suelo, luego de la realización de un cultivo, no es una práctica común en planteos productivos. Álvarez *et al.* (2016) han generado una serie de coeficientes que relacionan el rendimiento obtenido por los cultivos de trigo, soja y maíz, con la biomasa aérea y radical desarrollada. De esta forma se puede estimar el aporte de los residuos. Las relaciones residuos aéreos/granos (ambos expresados en materia seca) son de 1.9, 1.33 y 1, para los cultivos de trigo, soja y maíz, respectivamente. Como el rendimiento generalmente se encuentra expresado con la humedad comercial (14%), debe descontarse ese valor para que quede expresado en materia seca. Al valor anterior hay que sumarle lo aportado por las raíces. Se estima que las raíces equivalen, en promedio, al 20% de la biomasa aérea. Por otro lado, cabe recordar que del total de la biomasa aportada el 40% es C. Hay que tener en cuenta que no todos esos residuos pasarán a formar parte de la MO

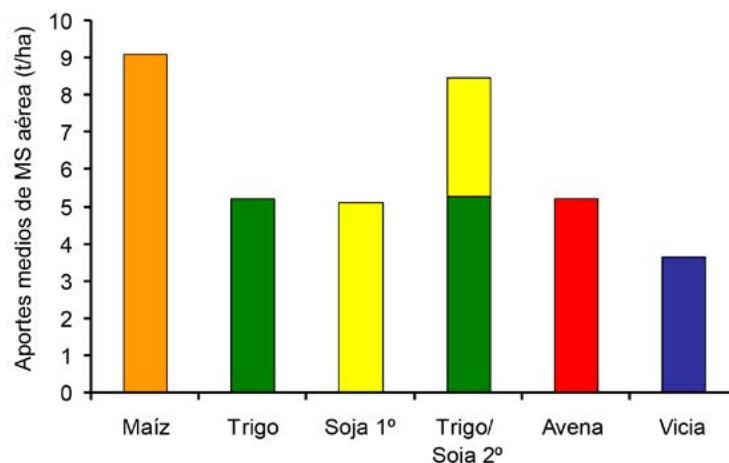


Figura 4. Aportes de residuos de distintos cultivos medidos en la Región Pampeana (Cordone *et al.*, 1993, 1996).

ya que una parte se descompondrá. En la Tabla 3 se muestran ejemplos de cálculos realizados a partir de los rendimientos de los 3 cultivos mencionados. Por ejemplo, en el caso de un trigo, cuyo rendimiento (con 14% de humedad) fue de 4 t/ha, lo primero que debe hacerse es descontar un 14% de su peso, que es lo que corresponde a la humedad. Luego, hemos dicho que la relación residuo aéreo/granos, para trigo era de 1.9. O sea, por cada 1 t de granos de trigo, se producen 1.9 t de residuos vegetales aéreos. A la vez, debe sumarse y 20% más, por las raíces. De la masa calculada, el 40% es lo que corresponde a C. Por lo tanto, con dichos cálculos se obtiene que dicho trigo le aportó al suelo 3.14 t de C/ha, de las cuales aproximadamente la mitad se humificarán y pasarán a formar parte de la MO.

Tabla 3. Estimaciones de los residuos aportados por los cultivos de trigo, soja y maíz a partir de los coeficientes generados por Álvarez *et al.* (2016).

	Trigo	Soja 2ª	Maíz	Soja 1ª
Rendimiento (14% hum.)	4 t/ha	3 t/ha	10 t/ha	4 t/ha
Descuento humedad	* 0.86	* 0.86	* 0.86	* 0.86
Residuo aéreo/grano	* 1.9	* 1.33	* 1	* 1.33
Suma de raíces	* 1.2	* 1.2	* 1.2	* 1.2
Contenido de C	* 0.4	* 0.4	* 0.4	* 0.4
Entrada (t C/ha)	3.14	1.59	4.13	2.19

En la Figura 5 se presenta el efecto de la adición creciente de aportes (rastrajo) sobre el contenido de materia orgánica en el Sudeste Bonaerense en suelos labreados.

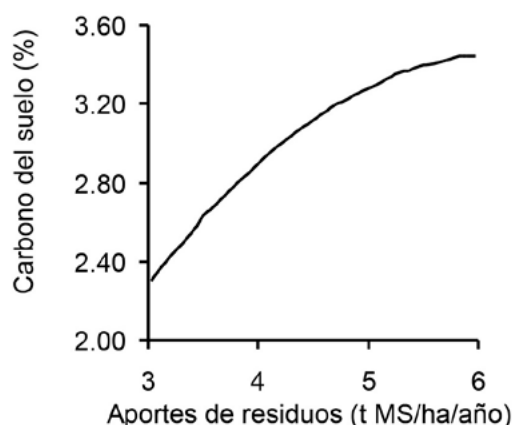


Figura 5. Contenido de carbono de 0-20 cm según los aportes de residuos y cantidad de cultivos de verano bajo labranza convencional en el SE Bonaerense (Studdert y Echeverría, 2000).

La introducción de pasturas en la rotación también permite aumentar los aportes e incrementar el contenido de materia orgánica del suelo, especialmente la fracción lábil (Figura 6).

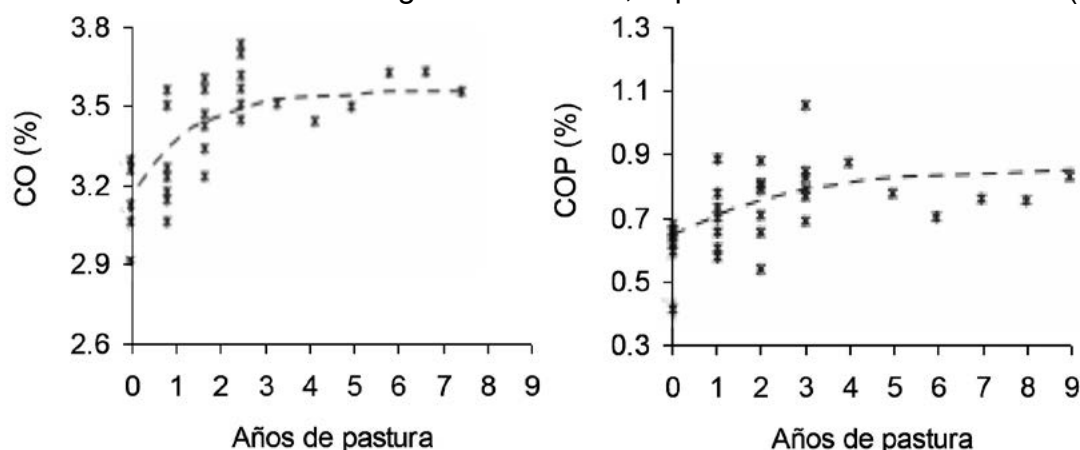


Figura 6. Evolución del contenido de carbono orgánico (CO) de 0-20 cm y carbono orgánico particulado (COP; fracción lábil) con los años de pastura mixta (leguminosa y gramíneas) (Sainz Rozas *et al.*, 2011).

El uso de abonos orgánicos es una práctica común para incrementar el nivel de MO en producciones orgánicas. Las aplicaciones rondan las 10 a 20 t/ha. En planteos extensivos, esta práctica se ve limitada por los grandes volúmenes que se requieren y las extensas superficies a tratar, en relación a las producciones intensivas.

Otra forma de mejorar el balance de MO se basa en disminuir las salidas. Como se vio anteriormente, las salidas de C del suelo son dos: la mineralización de la MO y la erosión. La mineralización disminuye con menores temperaturas, por disminuir la actividad microbiana. Por lo tanto, cualquier manejo que mantenga al suelo cubierto, disminuirá dichas salidas. Una forma de lograr lo anterior es mediante el manejo con planteos de siembra directa o labranza conservacionista. Dichas prácticas dejan los residuos de los cultivos en superficie, sin incorporarse en el suelo como lo hace la labranza convencional, disminuyendo así la temperatura. Asimismo, las labranzas conservacionistas pueden tener un efecto positivo sobre los aportes de C al suelo en regiones donde la acumulación de agua tiene un efecto importante sobre el rendimiento y, en consecuencia, sobre el aporte de residuos, como en la región Semiárida Pampeana. En la Figura 7 se presenta el efecto de la siembra

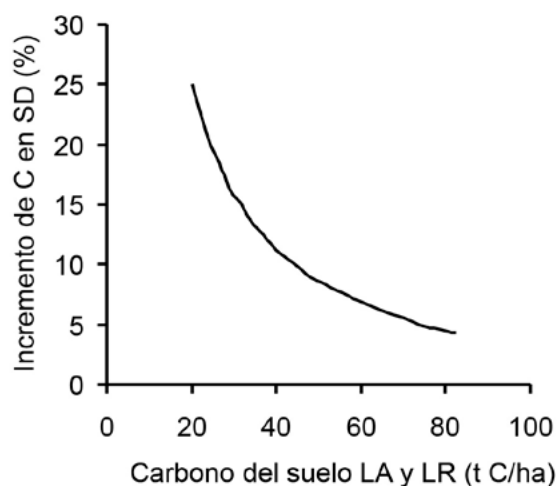


Figura 7. Incremento de Carbono orgánico del suelo con siembra directa comparado con sistemas con laboreo (LA= sistema con arado de reja y vertedera, LR= labranza reducida; Álvarez *et al.*, 2016).

directa sobre el carbono orgánico del suelo, en ensayos de larga duración de la región pampeana. El incremento porcentual es mayor cuando el contenido de carbono de los suelos es menor. En la Figura 8 se muestra la disminución del contenido de C orgánico del suelo, y de su fracción lábil, con los años de agricultura, en sistemas con laboreo y siembra directa (Sainz Rozas *et al.*, 2011). Allí se aprecia mostrando una menor caída en siembra directa.

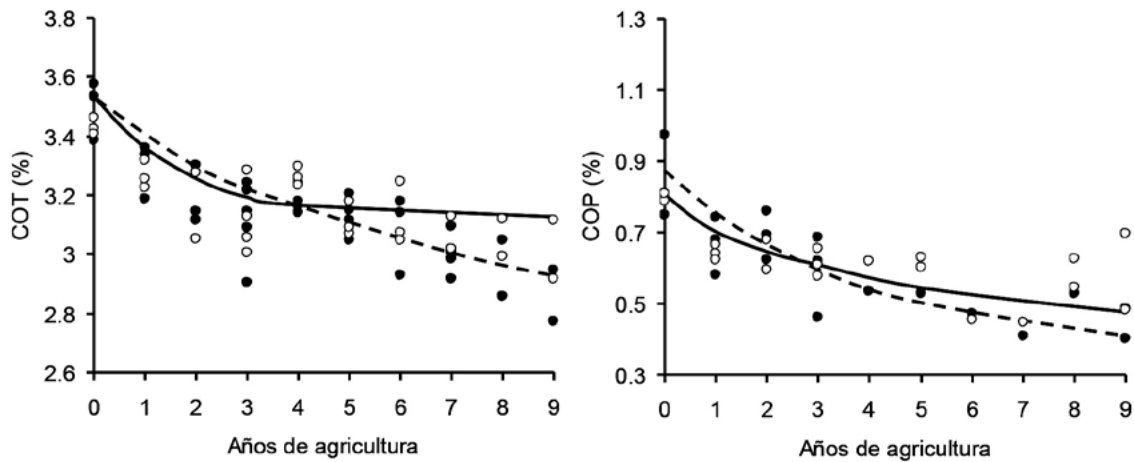


Figura 8. Evolución del contenido de carbono orgánico de 0-20 cm y carbono orgánico particulado (COP; fracción lábil) con los años de agricultura bajo labranza convencional línea punteada o siembra directa línea llena (Sainz Rozas *et al.*, 2011).

En todos los sistemas productivos donde no hay laboreo (pasturas, siembra directa, labranza reducida o vertical) se produce una acumulación de carbono orgánico en superficie. Esto resulta importante para tener mejores propiedades en superficie donde se produce el intercambio suelo atmósfera (Figura 9).

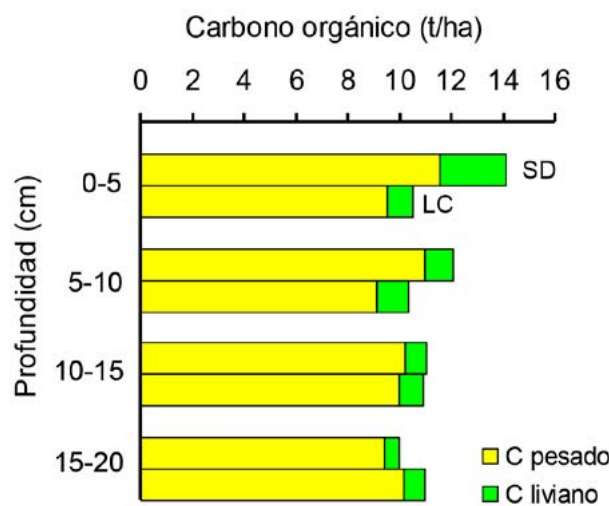


Figura 9. Distribución del carbono orgánico en profundidad (0-20 cm) bajo distintos sistemas de labranza en Pergamino luego de la aplicación de 12 a 15 años del manejo labranza convencional (LC) y siembra directa (SD) (Álvarez *et al.*, 2016).

La otra vía de pérdida de MO es por erosión. Por lo tanto, manejos que reduzcan la erosión, mejorarán el balance de C. Estos manejos se basan en dejar el suelo cubierto, tanto por vegetación viva (por ejemplo con cultivos de cobertura) o muerta (por ejemplo utilizando siembra directa). En situaciones de pendientes elevadas, debe trabajarse al suelo

en contra de la pendiente, y hasta recurrirse a la construcción de terrazas en situaciones extremas.

En conclusión, el mantenimiento o aumento de la materia orgánica edáfica resulta de la realización de un conjunto de buenas prácticas tendientes a lograr el mejor balance entre los aportes y salidas de carbono. En la Figura 10 se presenta un resumen de las mismas. En Capítulos posteriores se tratarán de manera más detalladas algunas de ellas (ejemplo cultivos de cobertura, abonos orgánicos).



Figura 10. Conjunto de prácticas tendientes a aumentar el contenido de materia orgánica del suelo.

Bibliografía

- ÁLVAREZ CR, PL FERNANDEZ, MA TABOADA. 2012. Relación de la inestabilidad estructural con el manejo y propiedades de los suelos en la Región Pampeana. *Ciencia del Suelo* 30: 173-178
- ÁLVAREZ R, HS STEINBACH, JL DE PAEPE. 2016. Carbono orgánico. En: *Fertilidad de suelos y fertilización en la Región Pampeana*. R Álvarez (Ed.). pp: 47-91
- BERHONGARAY G, R ÁLVAREZ, JJ DE PAEPE, C CARIDE, R CANTET. 2013. Land use effectson soil carbon in the Argentine Pampas. *Geoderma* 192: 97-110

- CORDONE GE, MC FERRARI, JJ OSTOJIC, G PLANAS. 1993. Caracterización de los residuos de cosecha de los principales cultivos del norte de la Provincia de Buenos Aires. En: XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo- Trabajos y Comunicaciones Resumidos, pp. 191-192.Mendoza.
- CORDONE G, E TORIONI. 1996. Producción de rastrojo de distintos cultivares de trigo en Pergamino según la fecha de siembra y la tecnología utilizada. Carpeta de Producción Vegetal, Tomo XIV; Serie Trigo, Información N° 177. EEAINTA Pergamino, 6 p.
- SAINZ ROZAS H, H ECHEVERRIA, H ANGELINI. 2011. Niveles de materia orgánica y pH en suelos agrícolas de las regiones Pampeana y extrapampeana de Argentina. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica, 2:6-12.
- STUDDERT GA, HE ECHEVERRIA. 2000. Crop rotation and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. Soil Sci. Soc. Am. J. 64: 1496-1503

NITROGENO

Helena Rimski-Korsakov y Carina R. Álvarez

El nitrógeno (N) es un nutriente esencial para las plantas, formando parte de aminoácidos, proteínas, clorofila, enzimas, ácidos nucleicos, reguladores de crecimiento y otros compuestos. Es el nutriente normalmente más requerido por las plantas, sólo superado en algunas excepciones por el potasio (Hawkesford *et al.*, 2011). En la Región Pampeana, al igual que en la mayor parte de los sistemas productivos del mundo, se lo ha definido como el segundo factor limitante para el crecimiento de los cultivos, después del agua (Álvarez y Grigera, 2005, Magrin *et al.*, 2005).

El ciclo del nitrógeno

El ciclo del nitrógeno (N) del suelo comprende un conjunto de entradas y de salidas de dicho nutriente (Figura 1; Tabla 1). Paralelamente, en el suelo ocurren una serie de transformaciones internas que no implican ni pérdidas, ni ganancias de N, sino que son procesos donde el N cambia de estado por la acción de microorganismos.

Tabla 1. Entradas, salidas y transformaciones del nitrógeno del suelo en producciones orgánicas.

Entradas	Salidas	Transformaciones internas
Abonos orgánicos	Exportación por cosecha	Mineralización
Fijación biológica	Volatilización	Descomposición
Fijación atmosférica (Precipitaciones)	Desnitrificación	Inmovilización
	Lixiviación	Humificación
	Erosión	

La magnitud de dichos procesos depende de las características de cada sistema en particular. A lo largo del presente capítulo iremos detallando cada uno de ellos. Todos estos procesos influyen en la disponibilidad de N para los cultivos, por lo que es importante conocer los factores que los afectan y sobre cuáles y en qué forma puede actuar el hombre.

El N inmediatamente disponible para las plantas es el que se encuentra en el suelo como amonio y nitratos. Dichas fracciones solo representan alrededor del 2% del N total del suelo. El resto del N se encuentra dentro de la materia orgánica humificada y debe mineralizarse para pasar a estar en forma inorgánica y disponible para los cultivos. Al N contenido en los residuos vegetales, no se lo considera como N del suelo. Sin embargo, al descomponerse los residuos, este N pasará a estar disponible para las plantas.

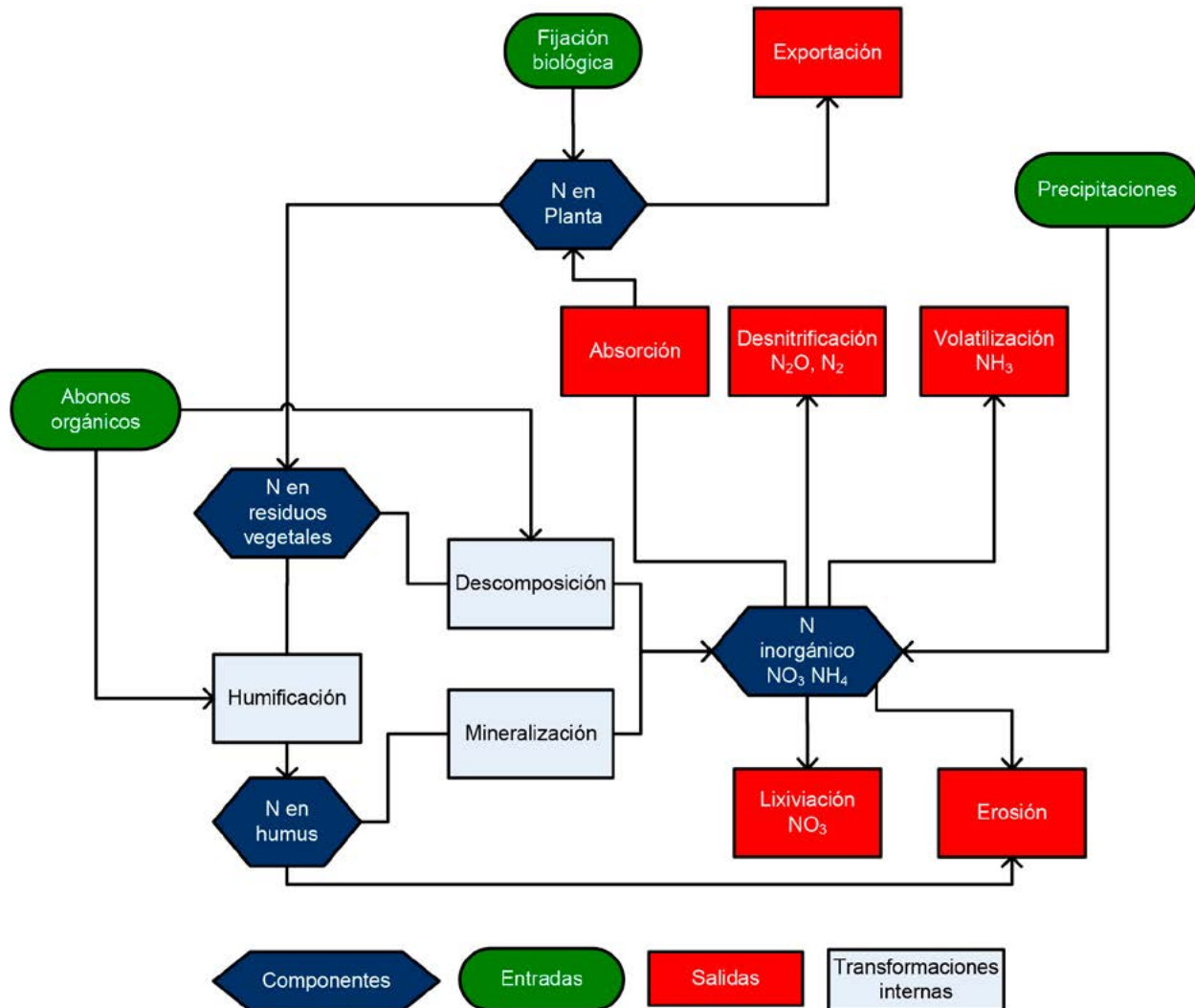


Figura 1. Ciclo del nitrógeno del suelo.

Las grandes reservas de N que abastecen al N disponible para las plantas son la atmósfera y la materia orgánica del suelo. Por un lado, el 78% del aire es N, principalmente N_2 . Por el otro, en la región pampeana, en la materia orgánica del suelo se pueden encontrar valores de 0.05 a 0.3% de N orgánico. Ambas fuentes no están inmediatamente disponibles para los vegetales. El N atmosférico entra al sistema por la fijación biológica de microorganismos que poseen esa capacidad. Dichos microorganismos pueden establecer relaciones simbióticas con determinadas especies o ser de vida libre en el suelo. Por otro lado, otro grupo de microorganismos debe mineralizar la materia orgánica para transformar el N retenido en la misma a formas disponibles para las plantas (NO_3^- y NH_4^+).

Evaluación del nitrógeno del suelo

Para cuantificar los niveles de N orgánico y de nitratos se debe realizar un muestreo de suelo. Tanto el N orgánico como el inorgánico presentan concentraciones mayores en superficie para ir disminuyendo a medida que se profundiza en el perfil. Cuando se evalúa la disponibilidad de N el muestreo del suelo se realiza hasta los 20-30 cm de profundidad para la fracción orgánica. Para determinar el contenido de nitratos se debe muestrear hasta la profundidad en la que se produce la absorción activa por los cultivos. Por ejemplo, para

producciones extensivas dicha profundidad se encuentra en los 60 cm. Para cultivos intensivos, dicha profundidad puede ser menor. Por ejemplo, en la zona de Balcarce, para el cultivo de papa se muestrea hasta los 40 cm.

Como promedio para la región pampeana húmeda se considera que la concentración de nitratos disminuye el 50% cada 20 cm hasta los 60 cm de profundidad. Por lo tanto, puede muestrearse el suelo hasta los 20 cm y luego estimar la cantidad de nitratos hasta los 40 y/o 60 cm.

El N orgánico es común que sea estimado a partir de los niveles de materia orgánica o carbono orgánico, teniendo en cuenta que la relación C/N promedio para nuestros suelos es de 10/1.

Como mínimo se deben extraer 25 submuestras, independientemente de la superficie del lote o tablón hortícola. Luego de homogeneizar las submuestras se envía una muestra compuesta al laboratorio de aproximadamente 1 kg. Los resultados que mandará el laboratorio serán expresados en alguna de las siguientes formas:

	Unidades
N orgánico	%
	g/kg
Nitratos	ppm NO ₃
	ppm N-NO ₃
	mg/kg (= ppm)

El objetivo final de los análisis de suelos es conocer la cantidad de N expresada en kg N/ha. Para llegar a dicho valor se requiere realizar una serie de cálculos. A continuación se muestran ejemplos de los cálculos más comunes.

1) *Calcular la cantidad de N orgánico de 0-20 cm expresado en kg N/ha.*

- a) N orgánico = 0.12%
 Profundidad = 0-20 cm
 1 ha = 10000 m²
 Densidad aparente (por ejemplo) = 1.25 t/m³

N orgánico (kg N/ha) = 10000 m²/ha * 0.2 m * 1.25 t/m³ * 0.12/100 = 3000 kg N orgánico/ha

- b) MO = 2.5%; MO/C orgánico = 0.58
 Relación C/N= 10/1
 Profundidad = 0-20 cm
 Densidad aparente (por ejemplo) = 1.25 t/m³

N orgánico (kg N/ha) = 10000 m²/ha * 0.2 m * 1.25 t/m³ * 2.5/100 * 58/100 * 1/10 = 3625 kg N orgánico/ha

- c) C orgánico = 1%
 Relación C/N= 10/1

N orgánico (kg N/ha) = 10000 m²/ha * 0.2 m * 1.25 t/m³ * 1/100 * 1/10 = 2500 kg N orgánico/ha

- d) N orgánico = 1.5 g N /kg suelo

N orgánico (kg N/ha) = 10000 m²/ha * 0.2 m * 1.25 t/m³ * 1.5 g N/kg suelo * 1000 kg/t * 0.001 kg/g = 3750 kg N orgánico/ha

2) Calcular la cantidad de N en forma de nitratos de 0-60 cm expresado en kg N/ha.

- a) $\text{NO}_3 = 40 \text{ ppm}$
 Profundidad 0-20 cm
 Densidad aparente = 1.25 t/m³
 Peso atómico del N = 14
 Peso atómico del O = 16

$\text{NO}_3 \text{ (kg NO}_3\text{/ha 0-20 cm)} = 10000 \text{ m}^2\text{/ha} * 0.2 \text{ m} * 1.25 \text{ t/m}^3 * 40 \text{ ppm} * 1/1000000 * 1000 \text{ kg/t} = 100 \text{ kg NO}_3\text{/ha}$

$\text{N-NO}_3 \text{ (kg N-NO}_3\text{/ha 0-20 cm)} = 100 \text{ kg NO}_3\text{/ha} * 14/62 = 22.58 \text{ kg N-NO}_3\text{/ha de 0-20 cm}$

$\text{N-NO}_3 \text{ (kg N-NO}_3\text{/ha 0-60 cm)} = 22.58 + (22.58 * 0.5) + (11.3 * 0.5) = 39.5 \text{ kg N-NO}_3\text{/ha de 0-60 cm}$

Síntomas visuales de deficiencia de nitrógeno en la planta

Ante la presencia de un déficit de N es común encontrar colores amarillentos por la menor cantidad de clorofila. Estos síntomas se ubican principalmente en las hojas más viejas, dado que se moviliza de éstas a las más jóvenes o hacia los órganos reproductivos. También se aprecian disminuciones en el tamaño de las hojas y en el número de ramificaciones.

Entradas de nitrógeno al suelo

Ingreso de N con las precipitaciones

Esta vía de ingreso de N en el sistema es de baja importancia en nuestras situaciones productivas ya que no conviven las zonas agrícolas con las industriales. En estas últimas se incrementa esta entrada. Un relevamiento realizado en Pergamino que midió la cantidad de N ingresada por esta vía determinó que fue de 3 kg N/ha/año (Carnelos *et al.*, 2014).

Fijación biológica

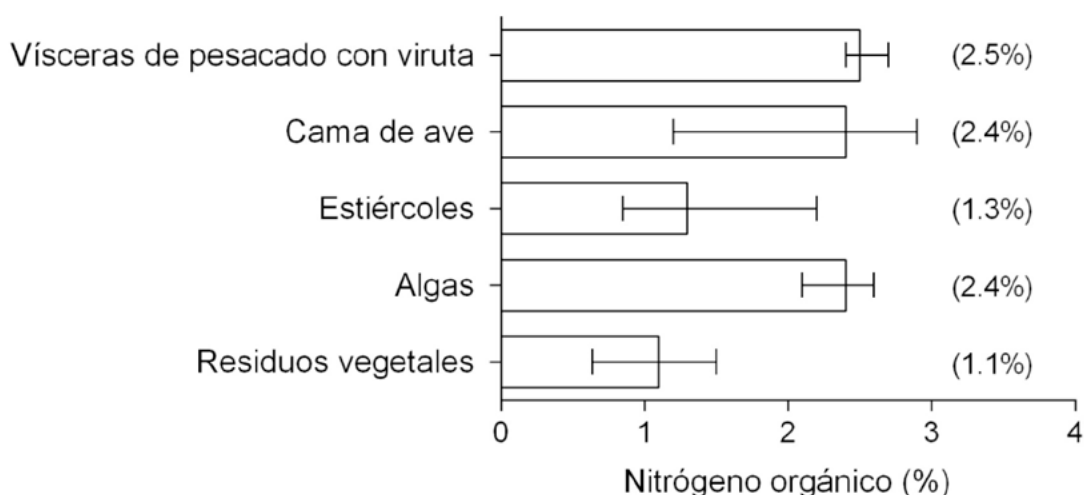
El principal ingreso de N al suelo en situaciones extensivas es la fijación biológica. La fijación puede ser llevada a cabo por microorganismos libres o por aquellos que establecen una simbiosis con la planta. La cantidad de N fijada por los microorganismos de vida libre (*Azotobacter* y *Azospirillum*) no supera los 20 kg N/ha/año (Tabla 2). Por otro lado, los *Rhizobium*, establecen relaciones simbióticas con especies de la familia leguminosas. Las magnitudes de fijación en estos casos son significativamente mayores. Cuando en la rotación se incluyen pasturas de alfalfa, que suele estar de 4 a 5 años, la fijación puede alcanzar valores de 600 kg N/ha/año. La soja también pertenece a la familia de las leguminosas y establece relaciones con el *Bradyrhizobium japonicum*. Esta simbiosis puede generar ingresos de N importantes (Tabla 2), sin embargo en general no llegan a cubrir las salidas por exportación en los granos. Por lo tanto, el balance de N de la soja suele ser negativo.

Tabla 2. N fijado anualmente por microorganismos simbióticos y no simbióticos (Adaptado de Caffaro y Berhongaray, 2013).

	Fijación biológica de N Kg N/ha/año
Microorganismos de vida libre	< 20
Soja-Bradyrhizobium japonicum	60 a 160
Alfalfa-Sinorhizobium meliloti	130 a 600

Abonos orgánicos

Los abonos orgánicos deben cumplir con una serie de requisitos para poder ser usados en producciones orgánicas, como ser el compostado previo en el caso de los de origen animal. Habiendo cumplido con dichos requisitos, los abonos orgánicos pueden ser utilizados con dos objetivos: mejorar las condiciones físicas de los suelos y suministrar nutrientes a las plantas. La cantidad de nutrientes que poseen es muy variable y depende del origen del mismo (Figura 2). Los abonos cuentan con una cantidad de N inmediatamente disponible para las plantas (amonio y nitratos) y otra en la que está formando parte de la fracción orgánica y que previamente debe mineralizarse para pasar a estar disponible. La cantidad de amonio y nitratos es muy variable y difícilmente se conoce en el momento de la aplicación. En una recopilación realizada por Álvarez *et al.* (2013), encontraron valores de amonio que iban desde 10 ppm N-NH₄ en estiércoles compostados hasta 1865 ppm en compost de vísceras de pescado con viruta. Por otro lado, los nitratos reportados variaron de 900 a 18500 ppm de N-NO₃ en compost de cama de ave.

**Figura 2.** Composición de diferentes abonos orgánicos (Adaptado de Álvarez *et al.*, 2013). Líneas: valores mínimos y máximos. Entre paréntesis: valor medio.

Conocer la tasa a la que se mineralizará el abono, para saber cuanto N estará potencialmente disponible para el cultivo, es muy difícil. Es escasa la información que existe al respecto y a la vez, dada la variabilidad de abonos y composiciones es difícil extrapolarla. Con el fin de dar un ejemplo de las magnitudes de dichas tasas, a continuación se muestran los resultados de dos ensayos donde se midieron las tasas de mineralización de diferentes residuos (Tabla 3 y 4).

Tabla 3. Tasas de mineralización de un estiércol vacuno desde el 1º al 4º año después de su aplicación (Pratt *et al.*, 1973).

	1º año	2º año	3º año	4º año
Estiércol vacuno (1.5% N total)	35%	10%	5%	2%

Tabla 4. Tasa de mineralización del N presente en diferentes abonos orgánicos, durante el primer año desde la aplicación (Eghball *et al.*, 2002).

	N mineralizado (%)
Residuos de feedlot	30
Estiércol vacuno compostado	18
Estiércol de gallinas	55
Estiércol de cerdo	40
Residuos de tambo	21

Por ejemplo, utilizando la Tabla 4, se estima que se mineralizarán 23 kg N/ha durante el primer año después de haber aplicado 10 t/ha de un estiércol vacuno compostado (1.3% N orgánico):

$$\text{N mineralizado (1º año)} = 10 \text{ t/ha} * 1000 \text{ kg/t} * 1.3/100 * 18/100 = 23 \text{ kg N/ha}$$

Salidas de nitrógeno del suelo

Salida por cosecha

El N presente en los órganos de cosecha de los vegetales es la principal salida de N de los suelos en situaciones productivas.

La magnitud de dicha salida depende del rendimiento obtenido y de la concentración del N en el producto cosechado. A la vez, estos dos valores dependen de las especies en cuestión y de las características ambientales existentes.

No debe confundirse el valor de exportación de N por cosecha con el de la absorción total del cultivo. La relación entre ambas es el Índice de cosecha del N.

$$\text{Índice de cosecha} = \frac{\text{N exportado}}{\text{N absorbido}}$$

En la Tabla 5 se detallan los valores de absorción total y exportación para una serie de cultivos (Ciampitti y García, 2007 y 2008). Poniendo como ejemplo al cultivo de trigo, si el rendimiento alcanzado fue de 5000 kg/ha (5 toneladas/ha) y deseamos calcular cuanto fue la absorción total y la exportación, utilizando los datos de la tabla 5 procederíamos:

$$\text{Absorción total} = 5 \text{ t/ha} * 30 \text{ kg N/t} = 150 \text{ kg N absorbido/ha}$$

$$\text{Exportación} = 5 \text{ t/ha} * 21 \text{ kg N/t} = 105 \text{ kg N exportado/ha}$$

De lo anterior surge que el índice de cosecha de N para el trigo en este caso fue de 0.7 (105/150).

En general, los valores de absorción expresados por tonelada de producto son menores cuando se trata de hortalizas y frutales en relación a cereales u oleaginosas. Sin embargo la absorción por hectárea es similar entre estos grupos. Esto se debe a que el rendimiento de las hortalizas y frutales es mayor por poseer gran contenido de agua en sus tejidos.

Tabla 5. Cantidad de nutriente total absorbido y exportado en los órganos cosechables expresado en kg de nutriente por tonelada de órgano cosechable (adaptado de Ciampitti y García, 2007 y 2008).

Especie	Absorción	Exportación
	(kg N/t producto)	
Trigo	30	21
Maíz	22	15
Arroz	22	15
Cebada	26	15
Sorgo granífero	30	20
Centeno	26	15
Avena	34	20
Soja	75	55
Girasol	40	24
Colza	60	38
Lino	45	30
Maní	69	44
Olivo	16	12
Algodón	150	70
Caña de azúcar	5	3.4
Yerba mate		9
Tabaco	65	32
Tomate	2.8	1.9
Pimiento	3.7	2.4
Zapallito	4.2	1
Lechuga	2	1.5
Brócoli	3.4	2.1
Espinaca	5.1	3.3
Cebolla	3.9	2.5
Remolacha	6	3.5
Zanahoria	4	2
Papa	5.5	3.5
Batata	5	3
Almendro	83.3	35.3
Durazno	5.1	2.8
Frutilla	10.2	2.9
Manzana	3.6	2.5
Uva	6.9	4.4
Pera	2.6	1.7
Limón	6.3	1.6
Mandarina	4.4	1.5
Naranja	5.7	2
Pomelo	2.5	1.1
Nogal	14.7	8.4

Por ejemplo, realizando el mismo cálculo anterior, pero ahora para un cultivo de tomate cuyo rendimiento fue de 50000 kg/ha (50 t/ha):

$$\text{Absorción total} = 50 \text{ t/ha} * 2.8 \text{ kg N/t} = 140 \text{ kg N absorbido/ha}$$

$$\text{Exportación} = 50 \text{ t/ha} * 1.9 \text{ kg N/t} = 95 \text{ kg N exportado/ha}$$

$$\text{ICN} = 0.68$$

También se puede estimar la cantidad de N exportado si se conoce el rendimiento y la concentración de N en el producto cosechado.

$$\text{Exportación} = \text{Rendimiento (kg producto/ha)} * \text{Concentración de N (\%)} / 100$$

Por ejemplo, para un cultivo de soja que rindió 3000 kg/ha y la concentración de N en sus granos fue de 5.5% se debería calcular:

$$\text{N exportado} = 3000 \text{ kg/ha} * 5.5\% / 100 = 165 \text{ kg N exportado/ha}$$

Cuando se trata de producciones pecuarias, las salidas de N del sistema son mucho menores que en las producciones agrícolas. Por ejemplo, se estima que un vacuno tiene aproximadamente 26 g N/kg y que en promedio sale con un peso de 500 kg. Por lo tanto, la salida del sistema fue de 13 kg N/ha/año. Este cálculo varía dependiendo del tiempo de engorde requerido para llegar al peso objetivo.

Pérdidas por lixiviación de nitratos

Los nitratos prácticamente no interaccionan con la fase sólida del suelo, por lo que son muy móviles en el mismo. Se encuentran en la solución edáfica y cuando hay balances hídricos positivos, se desplazan hacia horizontes más profundos. Por lo tanto, las condiciones predisponentes para que exista este tipo de pérdida son: presencia de nitratos en el suelo, balances hídricos positivos y suelos con muchos macroporos (texturas gruesas, grietas o bioporos). También es importante la profundidad de las raíces de los cultivos presentes. Cultivos con raíces más superficiales presentarán una profundidad de pérdida también más superficial (Figura 3). Cuando los nitratos se encuentran dentro de la zona de absorción activa de las raíces pueden ser aprovechados, por lo que no se los considera lixiviados (Figura 3).

Para minimizar estas pérdidas debe tenerse vegetación creciendo y, por lo tanto, absorbiendo nitratos en los momentos de mayor riesgo y de esta forma disminuir la cantidad de nitratos potencialmente lixiviables. También deben ajustarse las dosis de aplicación de abonos para no generar excesos de nitratos no aprovechados por los cultivos.

El destino final de los nitratos lixiviados son los acuíferos subterráneos. Su presencia en exceso en las aguas de consumo, tanto humano como animal, puede generar problemas para la salud. El Código Alimentario Argentino establece como máximo un valor de nitratos de 45 mg NO₃/L (equivalente a 10 mg N-NO₃/L) en agua destinada a consumo humano (CAA, 1969).

Este tipo de contaminación no está generalizada en nuestro país. Se han encontrado acuíferos con niveles que superan el umbral admisible estando relacionados con cercanías a los pozos ciegos, producciones intensivas con elevado uso de fertilizantes y abonos, combinado con riego, y producciones intensivas ganaderas.

Dependiendo de las condiciones ambientales y de manejo, en suelos no fertilizados de situaciones productivas extensivas es de esperar pérdidas que oscilen entre los 0 y 50 kg N/ha/año.

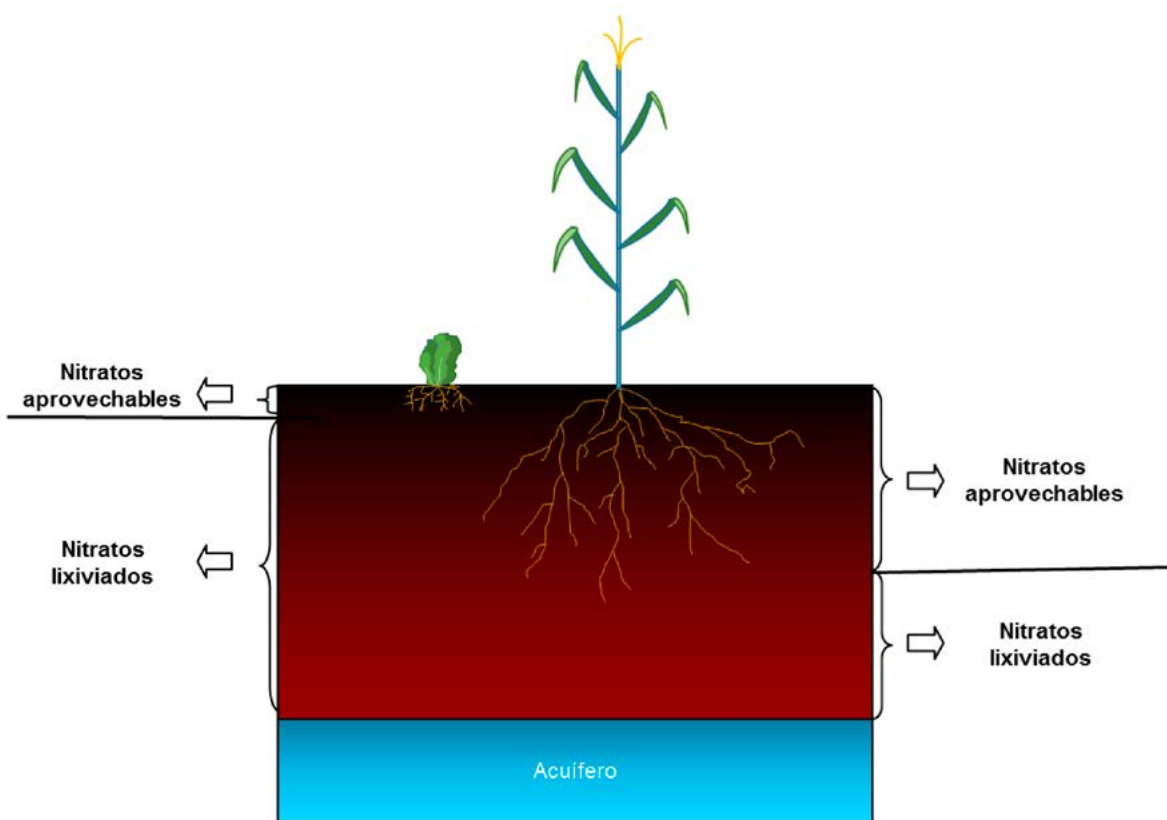


Figura 3. Esquema de la profundidad de lixiviación de nitratos según el tipo de cultivo.

Pérdidas por desnitrificación

El proceso de desnitrificación es llevado a cabo por organismos anaerobios facultativos que en condiciones de anaerobiosis utilizan los nitratos como aceptores de electrones en lugar del O₂. El producto final de dichas reacciones es la liberación de formas gaseosas de N: N₂O (óxido nitroso) y N₂ (N molecular).



Las condiciones predisponentes para la ocurrencia de estas pérdidas son básicamente las que favorezcan al crecimiento de los microorganismos desnitrificantes: condiciones de anoxia en el suelo (exceso hídrico), presencia de nitratos, carbono soluble y altas temperaturas (Figura 4).

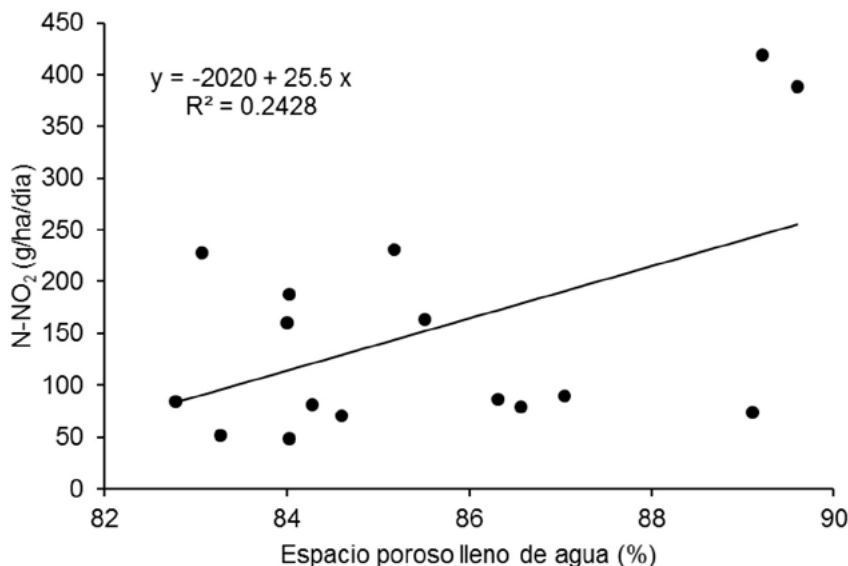


Figura 4. Oxido nitroso perdido por desnitrificación en situaciones no fertilizadas con diferentes contenidos hídricos del suelo (Adaptado de Sainz Rozas *et al.*, 2001).

El rango de pérdidas medidas desde suelos sin fertilizar en la región pampeana fue de 0.2 a 4.5 kg N-N₂O/ha (Palma *et al.*, 1997, Sainz Rosas *et al.*, 2001). Este tipo de pérdidas se encuentra actualmente en detallado estudio dado los efectos nocivos de los óxidos de nitrógeno sobre la atmósfera por ser parte de los gases de efecto invernadero.

Pérdidas por volatilización

Las pérdidas por volatilización implican la salida de N del suelo como amoníaco (NH₃). En este proceso no intervienen los microorganismos y el equilibrio de la ecuación tenderá a desplazarse hacia la derecha cuando: el pH del suelo es mayor, hay mayor temperatura y hay más amonio (NH₄⁺).



En la región pampeana, las pérdidas por volatilización en suelos en producción sin fertilizar son mínimas, variando desde 0.4 a 2.9 kg N-NH₃/ha/año (Sainz Rosas *et al.*, 1997; Barbieri y Echeverria, 2000; Rimski-Korsakov *et al.*, 2009). La aplicación de cualquier abono orgánico puede incrementarlas, pudiendo alcanzar niveles similares a los de los fertilizantes de síntesis química (Figura 5).

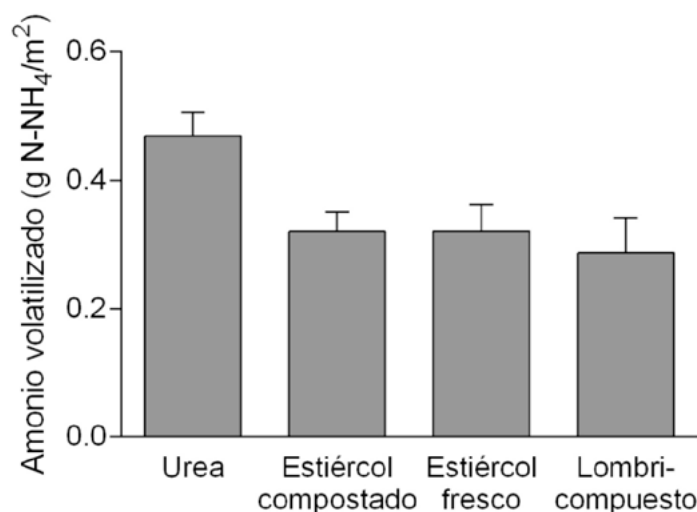


Figura 5. Volatilización acumulada en 4 meses a partir de suelos donde se aplicaron diferentes productos: urea (fertilizante de síntesis química, estiércol vacuno compostado, estiércol fresco y lombricompostado (Adaptado de Zubillaga *et al.*, 2004).

Transformaciones internas del nitrógeno del suelo

A continuación se detallarán una serie de transformaciones o procesos que involucran al N en el suelo, pero no implican ni pérdida ni ganancias de dicho elemento, simplemente cambios de su forma química.

Mineralización

La mineralización es el pasaje del nitrógeno orgánico presente en la materia orgánica humificada a formas de N inorgánico. Este proceso es llevado a cabo por microorganismos heterótrofos del suelo que utilizan las sustancias orgánicas carbonadas como fuente de energía.

La tasa de mineralización depende de condiciones ambientales como la humedad y temperatura del suelo, y edáficas como el contenido de materia orgánica y la textura del mismo. Al estar involucrados organismos vivos, a mayores temperaturas se incrementa la tasa de mineralización. Solo a temperaturas muy elevadas, no comunes en situaciones productivas, declina dicha tasa.

Para la Pampa Ondulada se cuantificaron los coeficientes de mineralización promedios mensuales del N orgánico de los primeros 30 cm (Álvarez, 1999) (Figura 6). Estos valores pueden ser utilizados para calcular cuanto N se mineralizará durante un determinado período.

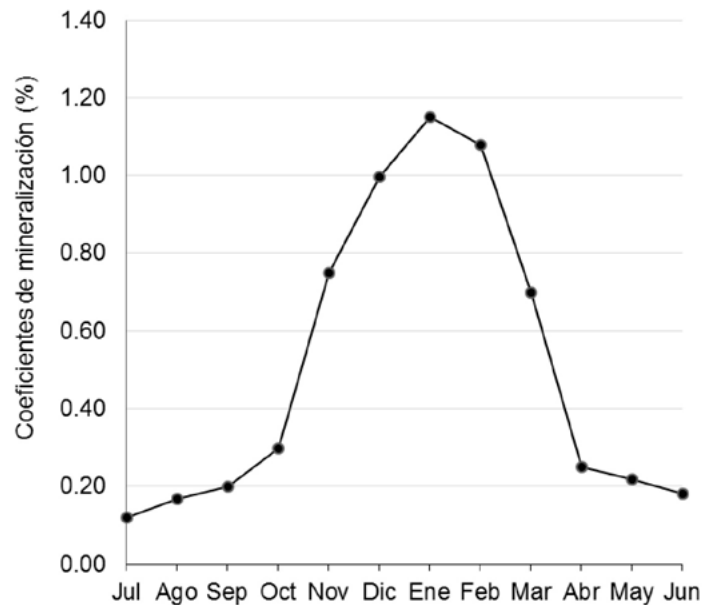


Figura 6. Coeficientes de mineralización mensuales del N orgánico para los primeros 30 cm de la Pampa Ondulada (Álvarez, 1999)

Los microorganismos mineralizadores son muy diversos y de diferentes condiciones de necesidades de oxígeno, por lo que el rango óptimo de humedad en el suelo para este proceso es amplio (Figura 7). Sin embargo, se detectó que en situaciones de muy baja humedad la mineralización se ve retardada.

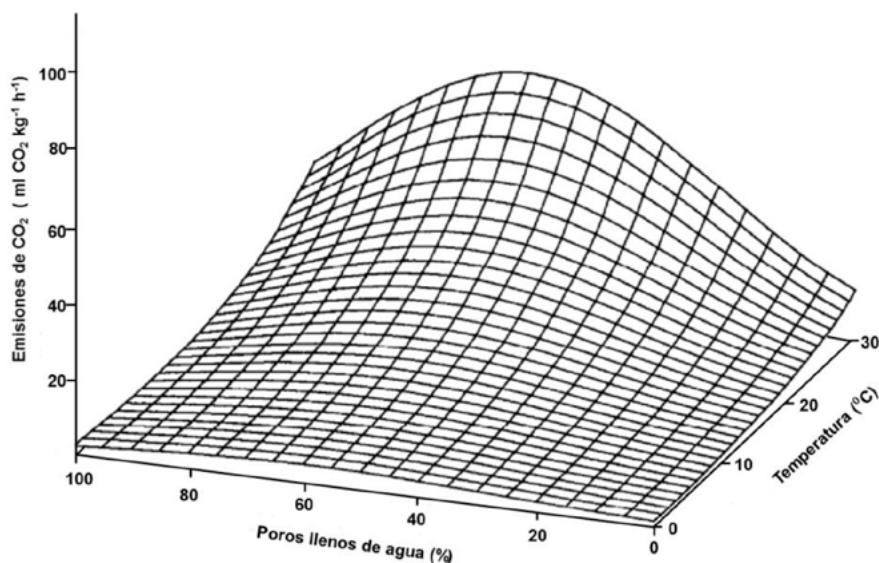


Figura 7. Efecto de la temperatura y humedad edáfica sobre la respiración microbiana (Adaptado de Howard y Howard, 1993)

El nitrógeno orgánico está íntimamente relacionado con la materia orgánica del suelo (Figura 8). Por lo tanto, suelos con mayores niveles de materia orgánica mineralizarán mayores cantidades de N.

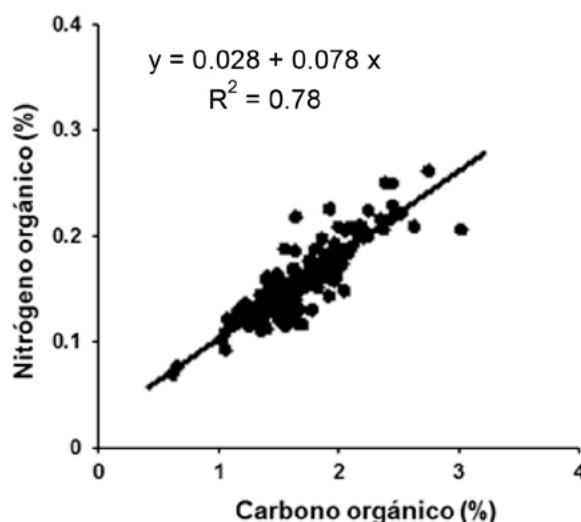


Figura 8. Relación entre en N y C orgánico del suelo (Álvarez y Steinbach, 2012).

Para conocer las cantidades de N que estarían liberándose por mineralización, haciéndolas disponibles para los cultivos, se requiere conocer el nivel de N orgánico del suelo, el período de absorción de N por el cultivo y el coeficiente de mineralización para dicho periodo (Figura 6).

Por ejemplo, si queremos saber cuanto N se mineralizará para un cultivo de maíz que se sembrará en un suelo con 2.5% de materia orgánica (0-30 cm) y una densidad aparente de 1.2 t/m^3 para dicha profundidad y que sumando los valores de mineralización correspondientes a los meses de absorción da un valor de 2.4%, deberá procederse de la siguiente manera.

$$\text{Peso suelo (0-30 cm)} = 10000 \text{ m}^2/\text{ha} * 0.3 \text{ m} * 1.2 \text{ t/m}^3 = 3600 \text{ t suelo/ha}$$

$$\text{MO} = 3600 \text{ t suelo/ha} * 2.5/100 = 90 \text{ t MO/ha}$$

$$\text{C orgánico} = 90 \text{ t MO/ha} * 0.58 = 52.2 \text{ t C orgánico/ha}$$

$$\text{N orgánico} = 52.2 \text{ t C orgánico/ha} * 1/10 = 5.22 \text{ t N orgánico/ha}$$

$$\text{N mineralizado} = 5.22 \text{ t N orgánico/ha} * 2.4/100 = 0.125 \text{ t N mineralizado/ha}$$

$$\text{N mineralizado} = 125 \text{ kg N-mineral /ha}$$

Descomposición

Los residuos vegetales tienen en su composición diferentes cantidades de N. Cuando la planta muere dichos residuos pueden seguir dos caminos: humificarse o descomponerse. Se estima que en promedio la mitad de la biomasa sigue cada uno de los caminos. Cuando se humifican los residuos pasan a formar parte del humus del suelo, con estructuras carbonadas más complejas que las que tenían inicialmente. Por otro lado, la descomposición es llevada a cabo por microorganismos de una forma similar que lo visto en la mineralización de la materia orgánica del suelo. Sin embargo, en el caso de la descomposición la tasa a la que ocurre es mayor que en la mineralización. Mientras que hablábamos de tasas promedio de mineralización del 5.7% anuales, para la descomposición hablamos del 50%. Si

bien tomamos el valor mencionado como promedio, éste varía de acuerdo al contenido de N que presentan los residuos. A medida que se incrementa la cantidad de N de los mismos es esperable que los microorganismos descompongan más rápidamente los residuos (Figura 9). Lo anterior se relaciona con la relación entre el contenido de C y N (relación C:N) (Tabla 6). Cuando hay más N la relación C/N disminuye y los microorganismos tienen menos limitante el N para formar sus estructuras C, por lo tanto se incrementa la velocidad de la reacción.

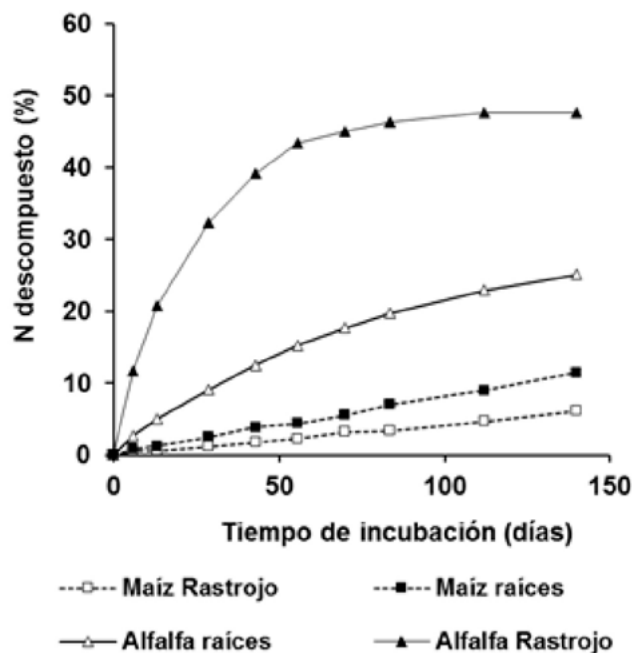


Figura 9. Nitrógeno descompuesto para residuos de diferente contenido de N (Paré *et al.*, 2000).

Tabla 6. Relación C:N residuos de diferentes cultivos.

Residuo	C:N
Maíz	80-90:1
Soja	48:1
Girasol	49:1
Trigo	101:1

Inmovilización

Cuando se incorporan residuos orgánicos al suelo, los microorganismos tienden a degradarlos. Al incrementarse el sustrato carbonado sobre el que pueden actuar, las poblaciones microbianas se incrementan. Para ello requieren N. Dicho N proviene en parte del residuo en sí y por otro lado del suelo. Por lo tanto, se produce una disminución del contenido de nitratos y consecuentemente del N disponible para los cultivos (Figura 10). A medida que se va terminando el sustrato carbonado, los microorganismos comienzan a morir y a liberar el N que tenían en sus tejidos, dejándolo disponible nuevamente. Residuos que contengan mayores relaciones C/N inmovilizarán más N del suelo. Por lo tanto, el período entre la incorporación de un residuo y el momento de liberación de N será mayor. Para que las plantas no sufran deficiencias de N momentáneas, ya que luego de la muerte de los microorganismos el N volverá a ser el original o superior, debe tenerse la precaución de dar el tiempo necesario para que finalice el proceso. Dicho tiempo dependerá del volumen

de residuo incorporado y su relación C/N. A mayores cantidades de residuos y mayores relaciones C/N, mayor será el tiempo requerido.

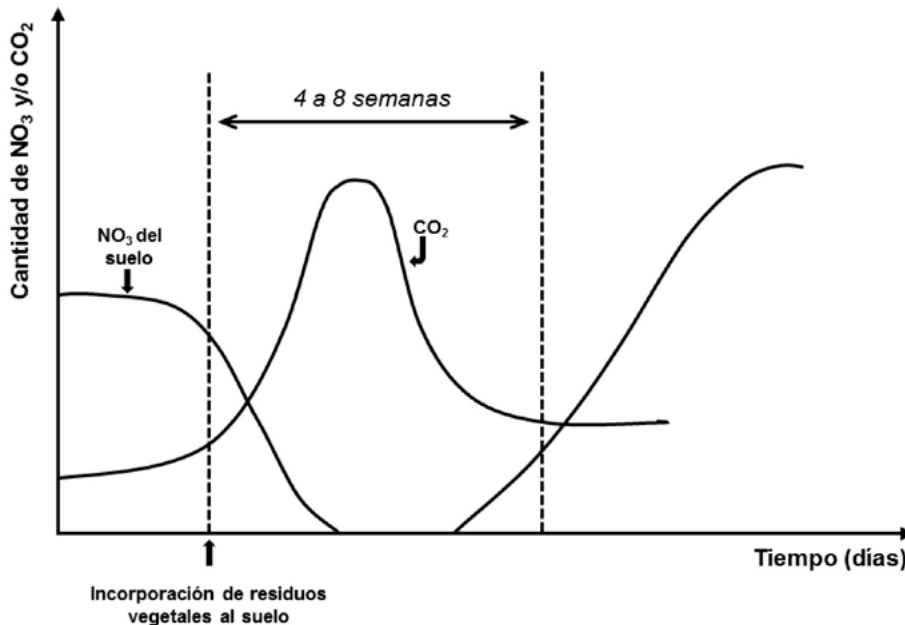


Figura 12. Esquema teórico del proceso de inmovilización (Darwich, 1998).

El sistema de labranza que se utilice en la producción afectará a la actividad microbiana. Dicho efecto será originado por los cambios en la temperatura y humedad del suelo. En sistemas donde se utiliza la labranza conservacionista y quedan residuos en la superficie, la temperatura del suelo será menor y la humedad mayor que cuando el suelo queda desnudo (Figura 13). Como se mencionó anteriormente, los microorganismos tienen un óptimo de temperatura y humedad. Si las condiciones de temperatura y/o humedad se apartan de dicho óptimo será menor la actividad microbiana. Por lo tanto, los procesos mencionados en el ciclo del N donde actúen los microorganismos se verán afectados. Por ejemplo, en la Figura 14 puede apreciarse como se incrementa la respiración microbiana, producto de la descomposición de residuos y mineralización de la materia orgánica del suelo, en los sistemas manejados bajo labranza convencional en los mismos ensayos que Figura 13.

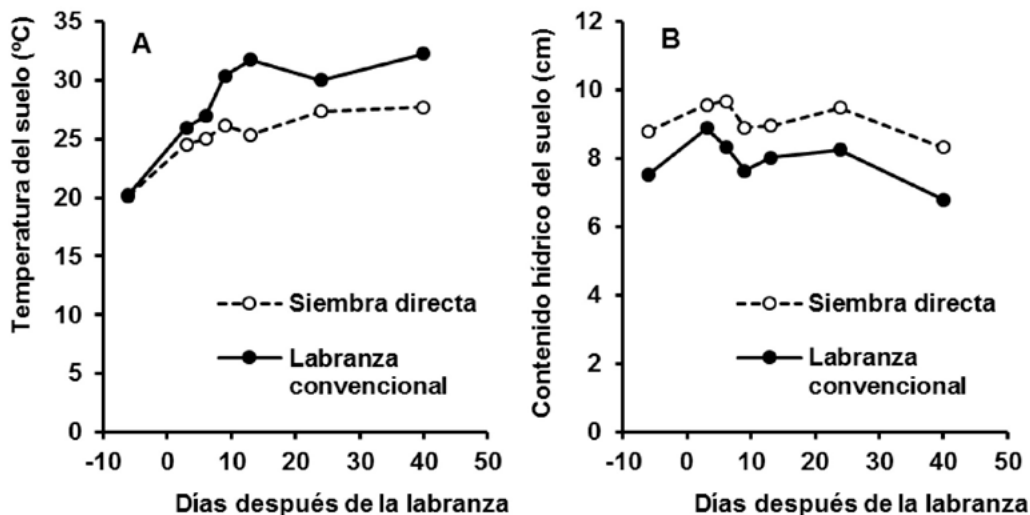


Figura 13. Efecto del sistema de labranza (siembra directa y labranza convencional) sobre la temperatura (A) y el contenido de humedad (B) del suelo (Álvarez *et al.*, 2001).

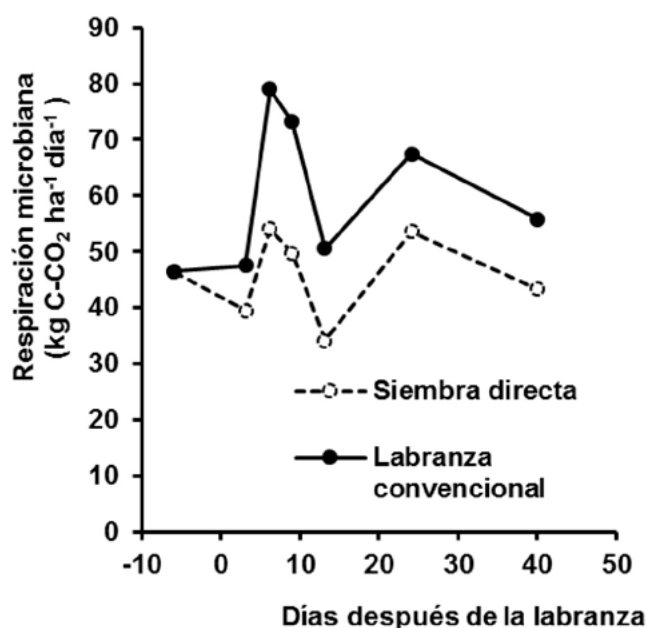


Figura 14. Respiración microbiana en relación al momento de labranza para sistemas de siembra directa y labranza convencional (Álvarez *et al.*, 2001).

Bibliografía

- ÁLVAREZ R, CR ÁLVAREZ, G LORENZO. 2001. Carbon dioxide fluxes following tillage from a mollisol in the Argentine Rolling Pampa. *Eur. J. Soil Biology* 37: 161-166.
- ÁLVAREZ R, HS STEINBACH, CR ÁLVAREZ. 2013. Manejo de la fertilidad en producción orgánica. En: R Álvarez *et al.* (Eds.) Fertilización de cultivos y pasturas. pp. 631-652.
- ÁLVAREZ R, HS STEINBACH. 2012. Materia orgánica y productividad. En: R Álvarez *et al.* (Eds.) Fertilidad de suelos. Caracterización y manejo en la Región Pampeana. pp 171-188.
- ÁLVAREZ R, S GRIGERA. 2005. Analysis of soil fertility and management effects on yields of wheat and corn in the Rolling Pampa of Argentina. *J. Agron. Crop Sci.* 191: 321-329.
- ÁLVAREZ R. 1999. Uso de modelos de balance para determinar los requerimientos de fertilizante nitrogenado de trigo y maíz. Editorial Eudeba, Bs. As. 58 p.
- BARBIERI PA, HE ECHEVERRIA. 2000. Evolución de las pérdidas por volatilización de amoníaco desde urea aplicada en otoño a una pastura perenne. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata. Abril del 2000. Actas en CD.
- CAA. 1969. Código Alimentario Argentino. Ley 18.284, Decreto reglamentario 2126/71.
- CAFFARO MM, G BERHONGARAY. 2013. Inoculantes. En: R Álvarez *et al.* (Eds.) Fertilización de cultivos y pasturas. pp. 613-631.
- CARNELOS DA, CL MICHEL, SI PORTELA, EG JOBBAGY, RB JACKSON, CM DI BELLA, D PANARIO, C FAGUNDEZ, LC GRION, LV CARREÑO, G PIÑEIRO. 2014. Variación espacial y temporal de las deposiciones atmosféricas en Argentina y Uruguay. En: Reunión Binacional Uruguay-Argentina de Agrometeorología y XV Reunión Argentina de Agrometeorología, 2014. Montevideo, Uruguay
- CIAMPITTI IA, FO GARCIA. 2007. Requerimientos nutricionales. Absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios. I Cereales, Oleaginosos e Industriales. Archivo Agronómico No. 11. IPNI Cono Sur

- CIAMPITTI IA, FO GARCIA. 2008 Requerimientos Nutricionales Absorción y Extracción de Macronutrientes y Nutrientes secundarios II. Hortalizas, Frutales y Forrajeras Archivo Agronómico No. 12. IPNI Cono Sur
- DARWICH N. 1998. Manual de la fertilidad de suelos y uso de fertilizantes. Mar del Plata, 182 pp
- EGHBALL B, BJ WIENHOLD, JE GILLEY, RA EIGENBERG. 2002. Mineralization of manure nutrients. *J. Soil Water Conserv.* 57: 470-473.
- HAWKESFORD M, W HORST, T KICHEY. 2011. Functions of macronutrients. En: HOWARD DM, PJA HOWARD, P.J.A. 1993. Relationships between CO₂ evolution, moisture content and temperature for a range of soil types. *Soil Biol. and Bioch.* 25: 1537-1546.
- MAGRIN GO, MI TRAVASSO, GR RODRIGUEZ. 2005. Changes in climate and crop production during the 20th century in Argentina. *Climatic Change* 72: 229-249.
- P MARSCHNER (Ed.). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. 3rd Edn., London Academic Press. pp.: 135-178
- PALMA RM, M RIMOLO, MI SAUBIDET, ME CONTI. 1997. Influence of tillage system on denitrification in maize-cropped soils. *Biol. Fertil. Soils* 25: 142-146.
- PARE T, EG GREGORICH, SD NELSON. 2000. Mineralization of nitrogen from crop residues and N recovery by maize inoculated with vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil* 218: 11-20.
- PRATT PF, FE BROADBERT, JP MARTIN. 1973. Using organic wastes as nitrogen fertilizer. *Calif. Agric.* 27: 10-13.
- RIMSKI-KORSAKOV H, G RUBIO, RS LAVADO. 2009. Effect of Water Stress in Maize Crop Production and Nitrogen Fertilizer Fate. *J. Plant Nutrition* 32: 565-578.
- SAINZ ROZAS H, HE ECHEVERRIA, GA STUDDERT, FH ANDRADE. 1997. Volatilización de amoníaco desde urea aplicada al cultivo de maíz bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo* 15: 12- 16.
- SAINZ ROZAS HR, HE ECHEVERRIA, LI PICONE. 2001. Denitrification in Maize Under No-Tillage: Effect of Nitrogen Rate and Application Time. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1314-1323.
- ZUBILLAGA MS, H RIMSKI-KORSAKOV, G TRAVERIA, RS LAVADO. 2004. Pérdidas de amoníaco por incorporación de fertilizantes o abonos orgánicos. XIX Congreso Nacional de Ciencias del Suelo, Paraná, junio del 2004. Pag: 169

FÓSFORO

Carina R. Álvarez y Flavio H. Gutiérrez Boem

Formas de fósforo en el suelo

El origen del fósforo (P) del suelo es la roca madre. El P se encuentra en el suelo en forma orgánica e inorgánica (Figura 1). A su vez, dentro del componente inorgánico puede encontrarse en solución (una fracción muy pequeña), adsorbido a los coloides del suelo, precipitado con calcio, hierro o aluminio, o en los minerales primarios (Rubio y Álvarez, 2012). El P adsorbido o precipitado puede o no estar en equilibrio con el fósforo de la solución del suelo, por lo que se lo separa en dos componentes: lábil y fijado.

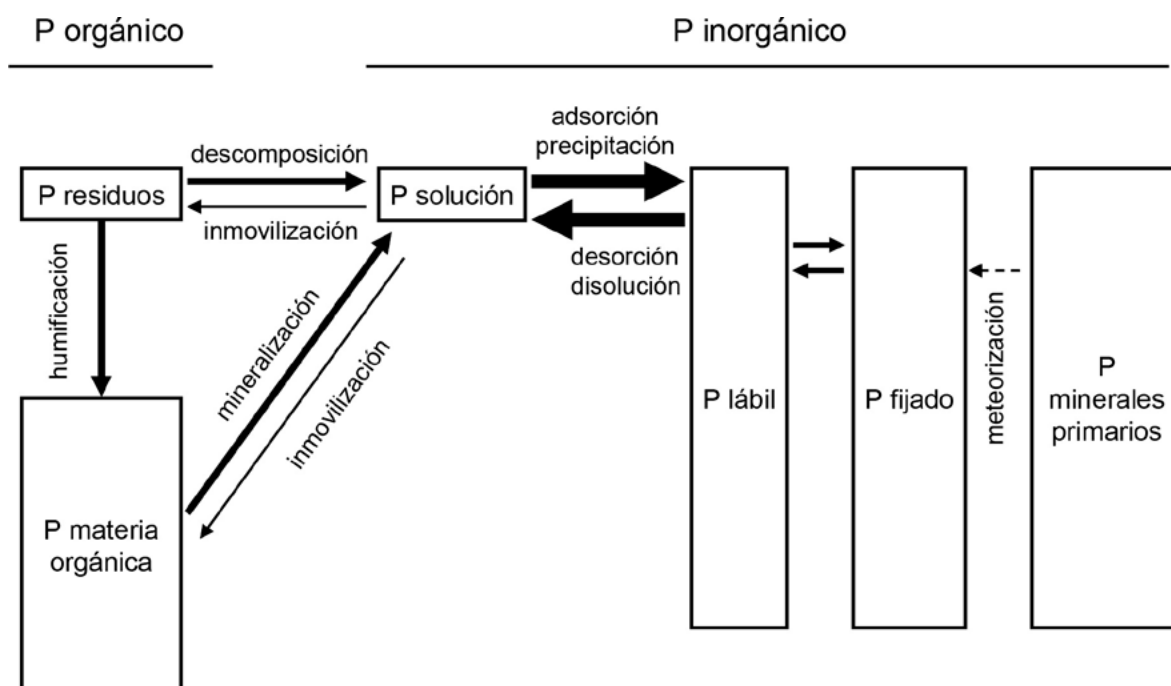


Figura 1. Formas de fósforo en el suelo.

En el componente orgánico podemos distinguir una fracción más lábil (más fácil de mineralizar) y otra más resistente a la degradación microbiana. La planta absorbe el P que está en solución, más el que puede pasar a la solución durante el ciclo del cultivo. En la mayoría de los suelos agrícolas de la Argentina, el P total del suelo oscila entre 400 y 800 ppm y el P orgánico representa entre el 40 y el 80% del P total (Rubio y Álvarez, 2012). El

P inorgánico es el principal responsable de la renovación del P en solución absorbido por las plantas. En la Figura 1 se presenta el ciclo del P y sus grados de labilidad. Se entiende por labilidad la velocidad con que las distintas fracciones pasan a estar disponibles o sea, pasan a solución. La cantidad de P en solución es mínima. Al ser absorbida otras formas van reponiéndola con distinta velocidad. Así, el P adsorbido a los coloides y precipitados solubles con calcio, hierro y aluminio son los que lo hacen con mayor velocidad. Esta fuerte interacción del P con la fase sólida del suelo hace que posea una muy baja movilidad en el perfil. Debido a la fuerte interacción con la fase sólida, la concentración de fósforo en la solución del suelo es muy baja. Por ejemplo, puede ser de 0.1 mg P/L que teniendo 20 cm de suelo, una humedad: 20%, densidad aparente: 1.2 t/m³, representa 48 g de P/ha (i.e. 0.02 ppm). Como puede observarse la cantidad de P en solución es muy baja comparada con el requerimiento de un cultivo. Por lo tanto, tiene que reponerse de manera continua desde las otras fracciones.

Disponibilidad de P para el vegetal

Las formas que contribuyen en mayor medida a la disponibilidad para el vegetal son el P inorgánico lábil, y en segundo término, el P orgánico lábil. Los métodos de determinación del P disponible han procurado reproducir la extracción por parte de las raíces del cultivo y, en tal sentido, se obtuvieron análisis que correlacionaron adecuadamente con el rendimiento (Figura 2). Para evaluar la disponibilidad de P en la Región Pampeana se utiliza el análisis de P Bray que evalúa parte dicha fracción.

La profundidad de muestreo más utilizada es de 20 cm porque en general allí se concentra la mayor cantidad de P extractable y raíces del cultivo (Figura 3). El P llega hasta las raíces por difusión, o sea por diferencia de concentración, que implica un movimiento a muy cortas distancias (~2 mm). Por lo tanto, una planta puede absorber P sólo del suelo que está en contacto con las raíces, con lo cual es fundamental una buena exploración radical para asegurar el acceso a este nutriente. Ningún sistema radical tiene una densidad de raíces tal como para absorber P de todo el volumen del suelo. Adicionalmente, es la profundidad que mejor correlacionó con el rendimiento de los cultivos y la que se utilizó para construir las relaciones entre P-extractable y rendimiento o respuesta a la fertilización (Figura 2).

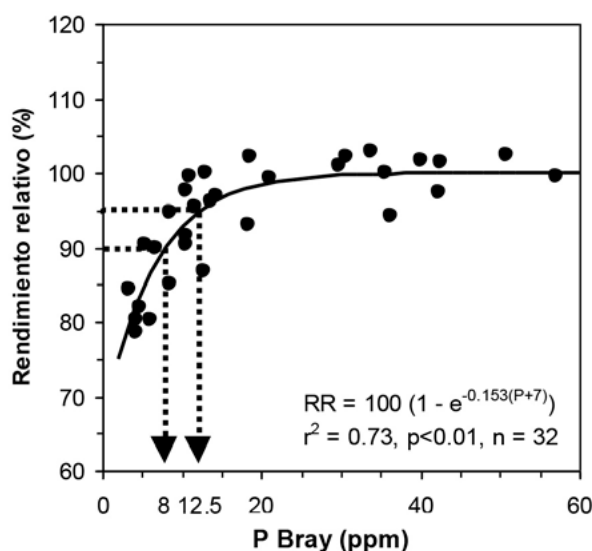


Figura 2. Rendimiento relativo del cultivo de soja en función del P Bray del suelo (Gutiérrez Boem *et al.*, 2006).

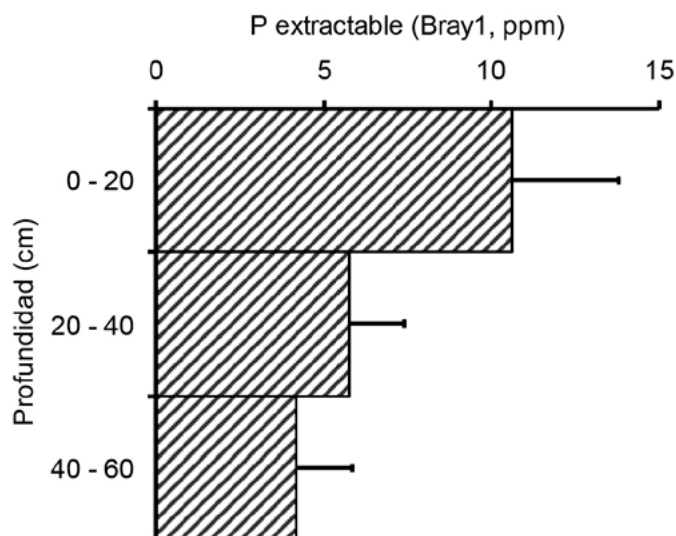


Figura 3. Distribución en profundidad de fósforo extractable. Promedio (y desvío estándar) de 14 suelos de la Pampa Arenosa, elaborado con datos de Barberis *et al.* (1987).

Un buen diagnóstico de la fertilidad fosfatada de un suelo debe partir necesariamente de un correcto muestreo, de modo que la muestra a ser analizada sea representativa del ambiente a evaluar. La elevada residualidad y la escasa movilidad del elemento determinan que se debe ser muy cuidadoso al realizar el muestreo. La cantidad de submuestras recomendadas es mayor que para otras propiedades. La presencia de animales en el lote, también debe ser tenida en cuenta. Debe evitar muestrearse los sectores del lote donde se concentran las deyecciones como las aguadas, los montes y cerca de los alambrados. En siembra directa el P tiende a concentrarse en superficie por su escasa movilidad. Por lo cual, debe respetarse en forma estricta la profundidad de muestreo de los modelos (en la mayoría de los casos 20 cm). Si se toman muestras más superficiales se sobrevaluarían los niveles de P extractable.

Síntomas visuales de deficiencia de fósforo en la planta

La deficiencia de fósforo produce una reducción del crecimiento de las hojas y de su número. Generalmente, un nivel de P inadecuado restringe la utilización de carbohidratos, aun cuando continúa la producción de estos compuestos por medio de la fotosíntesis. Ello provoca la acumulación de carbohidratos y un color verde oscuro en las hojas. En algunos cultivos, las hojas deficientes en P desarrollan un color púrpura (e.g. tomate y maíz). Debido a que el P es móvil en la planta, en situaciones de deficiencia el P se trasloca de los tejidos viejos a tejidos meristemáticos activos y por esta razón los síntomas aparecen en las hojas viejas (parte baja) de la planta. Sin embargo, estos síntomas de deficiencia rara vez se observan en el campo y la deficiencia de P generalmente se evidencia por un menor crecimiento y una pérdida apreciable de rendimiento o por la respuesta a la adición de este nutriente.

Balance de fósforo del suelo

El principal ingreso de P a los agroecosistemas es por el agregado de enmiendas orgánicas o fertilizantes minerales naturales y la principal salida es por la exportación en el producto cosechable (Figura 4). En agrosistemas manejados adecuadamente las pérdidas o ganancias debido a la erosión son minimizadas. Debido a la alta interacción del P

con la fase sólida del suelo, las pérdidas por lixiviación o lavado son de escasa magnitud. El escurrimiento superficial es la pérdida de P soluble en el agua de escurrimiento y se da en condiciones muy particulares de altos contenidos de P y escorrentía de agua.

Ello produce el enriquecimiento de P biodisponible de cuerpos de agua, generando el proceso de eutrofización. Este proceso es relevante desde el punto de vista ambiental, aunque aún no fehacientemente comprobado en nuestro país (Orroño *et al.*, 2006). El ingreso de P al sistema por deposición atmosférica en la región pampeana es mínimo, del orden de 200 g ha⁻¹ año⁻¹ (Lavado, 1983).

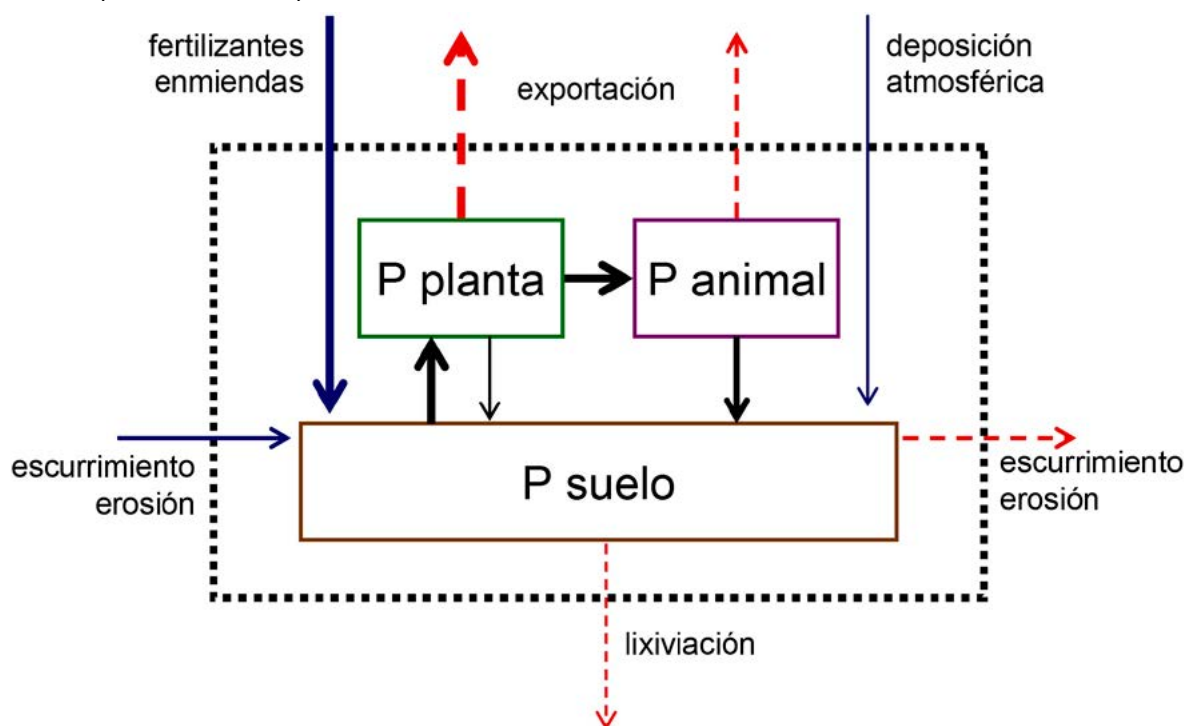


Figura 4. Balade de fósforo en agrosistemas.

Requerimiento y exportación de fósforo de distintos cultivos

Los cultivos tienen diferentes requerimientos, índice de cosecha y exportación de P por unidad de producto cosechable (Tabla 1). El requerimiento es la cantidad de P requerida para producir una tonelada de producto cosechable y el resto de biomasa necesaria para su producción. Es importante destacar que los requerimientos de P son mucho menores que los de nitrógeno (relación aproximada 10N a 1P).

Tabla 1. Requerimientos totales de P para producir una tonelada de producto cosechable, índice de cosecha de P y exportación por unidad de producto cosechable. (*) Expresado con el contenido hídrico de comercialización, para cultivos de granos 13-14% de humedad, para papa 85% (IPNI, 2009).

Cultivo	Requerimiento (kg P t ⁻¹ producto cosechable*)	Índice de cosecha (%)	Exportación (kg P t ⁻¹ producto cosechable*)
Trigo	5	80	4
Maíz	4	76	3
Soja	7	75	5
Girasol	5	80	4
Papa	0.5	70	0.35

La exportación total por unidad de superficie (kg P ha⁻¹) depende de los rendimientos alcanzados por cada cultivo, y se obtiene multiplicando el rendimiento por la exportación por tonelada cosechada. En el caso de producción animal la exportación de P en ganado vacuno es aproximadamente de 6.8 g/kg carne y 1 g/kg de leche.

Alternativas para equilibrar el balance de fósforo en producciones orgánicas

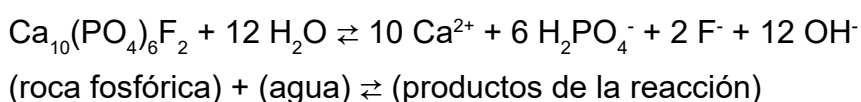
En producciones orgánicas extensivas, para equilibrar el balance de fósforo es necesaria la aplicación de fertilizantes minerales naturales. En producciones intensivas, por su escala más pequeña, se hace más viable el uso de abonos orgánicos. Para sostener la fertilidad de fósforo de los suelos es importante trabajar con balance cero (salidas=entradas), salvo que la disponibilidad sea muy alta, lo que permitiría tener balances negativos durante un tiempo sin comprometer la producción. Para tener un balance cero, el fósforo adicionado como fertilizante o enmienda debe ser equivalente al exportado por cosecha.

Roca fosfórica

La roca fosfórica puede ser utilizada en planteos orgánicos previo control de concentración de metales pesados. Su origen son yacimientos naturales de Marruecos, Estados Unidos, entre otros. Argentina no posee yacimientos de interés económico. El P presente en la roca es P soluble en ácido cítrico pero no en agua. Esto es una diferencia esencial con los fertilizantes sintéticos más comunes como superfosfato triple, fosfato mono y diamónico que son solubles en agua. Por lo tanto, para que el P de la roca fosfórica pase a estar disponible para el cultivo se requiere que el pH edáfico sea menor a 6, que haya buena humedad y que el P del fertilizante posea buena solubilidad en ácido cítrico (reactividad).

La reacción involucrada es:

Disolución de fluorapatita:



A su vez, las características de la roca y el tamaño de partícula condicionan la velocidad de liberación del P. Una granulometría menor a 0.15 mm y minerales de apatita con mayor sustitución de carbonatos por fosfatos en la estructura cristalina mejoran la reactividad. En la Tabla 2 se presentan las características del superfosfato triple (SPT) y de rocas fosfóricas de distintos orígenes (yacimientos de distintos países; Oberson y Frossard, 2005). Nótese que la reactividad y el P soluble en ácido cítrico (i.e. una medida de la reactividad) no están relacionadas con la concentración de P total de la roca. Rocas con alta concentración de P pueden tener una baja reactividad.

Cuando se quiere comparar la eficiencia de distintas fuentes de P, se suele usar una fuente soluble (como el SPT) como referencia y un tratamiento control (sin fertilización). De esta manera se puede calcular la respuesta al agregado de una roca fosfórica como porcentaje de la respuesta obtenida al agregado de SPT. Estas comparaciones deben ser realizadas para la misma dosis de P.

Tabla 2. Características de distintas fuentes de P.

Fuente de P	P total (grado) %	P-AC2% ¹ %	Reactividad ²
SPT	20	19.2	
Rocas fosfóricas:			
Túnez (Gafsa)	13.1	5.7	alta
Kazajistán	7.4	3.6	media
Jordania	13.6	3.9	media
Burkina Faso	11	2.6	baja
China	14.1	2.2	baja
Tanzania	10.8	0.9	muy baja

¹ P soluble en ácido cítrico 2% (como % de la roca)

² Basada en la sustitución CO₃/PO₄ en la estructura de la apatita.

Abonos orgánicos

Una revisión realizada con el material publicado en el país donde se evaluaban distintos composts (origen vegetal, animal o combinado) presentan concentraciones de fósforo que van de 0.15 a 1.7% (Álvarez *et al.*, 2013). Los composts producidos con materiales de origen animal presentan mayor concentración de P.

Parte del P presente en el compost está en forma inorgánica e inmediatamente disponible, mientras que otra parte del P inorgánico debe solubilizarse y el orgánico mineralizarse para estar disponibles. En la Tabla 3 se presenta la cantidad de P total, orgánico, inorgánico e inorgánico con distinta disponibilidad (P isotópicamente intercambiable en 1 minuto, 3 meses o más de 3 meses) de materiales no compostados y compostados de origen animal (Oberson y Frossard, 2005). Se observa que el compostaje disminuye el P inorgánico disponible debido a la formación de precipitados con calcio, magnesio, y otros cationes.

Tabla 3. Contenido de P y sus fracciones en distintos materiales orgánicos compostados y sin compostar. El P isotópicamente intercambiable es una medida de la disponibilidad el P inorgánico presente en el material.

	P total	P orgánico	P inorgánico	P isotópicamente intercambiable		
				< 1 min	1 min - 3 meses	>3 meses
Material		g P/kg MS		% del P inorgánico total		
Estiércol	12.4	3.34	8.96	55.3	11.5	33.2
Barro (efluentes animales)	8.78	2.88	5.9	22.9	26.1	51.0
Compost 1	3.24	0.49	2.75	19.3	5.8	74.9
Compost 2	3.40	0.41	2.99	7	5.3	87.7
Compost 3	3.75	1.23	2.52	15.1	6.7	78.2
Compost 4	4.78	1.07	3.71	3.2	22.1	74.7

Grado de disponibilidad y aprovechamiento del fertilizante fosforado

La absorción o aprovechamiento de los fertilizantes fosfatados solubles en el ciclo del cultivo varía entre un 10 y 30%, aún en condiciones donde no existan otros factores limitantes como agua o nitrógeno.

Ello se debe a la interacción del P con el suelo y a las características del cultivo en consideración.

En relación al suelo, el contenido y tipo de arcilla y el pH son los principales factores que regulan la disponibilidad final del P aplicado. El aprovechamiento del P presente en la roca fosfórica es aún menor ya que se le suma el proceso de disolución para pasar a estar disponible.

Otro factor que influye directamente sobre la recuperación del fertilizante por las plantas es la forma de aplicación.

La aplicación de la roca fosfórica se realiza, generalmente, en cobertura total y puede ser incorporada con una labor en planteos con labranza. A su vez, debe hacerse con anticipación para promover su solubilización.

En planteos de agricultura convencional, es habitual aplicar los fertilizantes fosforados en bandas y a la siembra de los cultivos ya que, en aplicaciones en línea, el fertilizante interacciona o reacciona con una masa de suelo menor quedando más disponible para el cultivo.

Efecto residual

Debido a que las pérdidas de P desde el suelo son mínimas por su fuerte interacción con el suelo, cuando se aplican fertilizantes fosfatados o abonos orgánicos en dosis que superan la exportación y en forma continua, los valores de P del suelo tienden a aumentar.

Este enriquecimiento de P disponible puede ser aprovechado por cultivos posteriores y a este proceso se lo denomina residualidad. Los principales factores que hacen a que haya residualidad son las dosis aportadas y la exportación por el cultivo.

Actividad de los microorganismos y la disponibilidad de fósforo

Los microorganismos del suelo actúan en la descomposición de los residuos y la mineralización de la materia orgánica, liberando P a la solución del suelo. En planteos de producción orgánica, con alto aporte de abonos, se observó mayor biomasa microbiana y mineralización de P (Oberson y Frossard, 2005). De todas formas, es importante destacar que la mayor contribución de P para los vegetales proviene de las fracciones inorgánicas.

También hay microorganismos que mejoran el aprovechamiento del P edáfico como las micorrizas, pseudomonas y azospirillum que serán tratados en otro capítulo.

Tabla 4. Fracciones orgánicas de carbono y fósforo del suelo y P intercambiable en diferentes tipos de producción en un experimento de larga duración en Suiza (Oberson y Frossard, 2005).

	Biodinámica	Orgánica	Convencional
Biomasa microbiana (mg C/kg)	198 a	176 b	120 c
Respiración microbiana (mg C/kg/día)	11 a	10.3 a	8.6 b
Mineralización de P (mg/kg/día)	2.5 b	1.7 a	1.5 a
P intercambiable (mg/kg/día)	27.6 a	24.8 a	31.8 b
P en la biomasa microbiana (mg P/kg)	17.6 a	16.5 b	9 c
P orgánico (mg P/kg)	398 a	375 ab	359 b

Biodinámica: compost, control mecánico de malezas, preparaciones biodinámicas; Orgánica: compost/abonos frescos, control mecánico de malezas; Convencional: fertilización mineral, control mecánico y químico de adversidades.

Bibliografía

- ÁLVAREZ R, HS STEINBACH, CR ÁLVAREZ. 2013. Manejo de la fertilidad en producción orgánica. En: Fertilización de Cultivos y Pasturas. R Álvarez, P Prystupa, M Rodríguez, CR Álvarez (Eds). EFA, UBA: 631-652.
- BARBERIS LA, G DUARTE, A SFEIR, L MARBAN, M VAZQUEZ. 1987. Respuesta del trigo a la fertilización fosforada en la Pampa Arenosa húmeda y su predicción. Ciencia del Suelo 5: 166-174.
- GUTIERREZ BOEM FH, P PRYSTUPA, CR ÁLVAREZ. 2006. Comparación de dos redes de ensayos de fertilización fosforada del cultivo de soja. XX Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo, Salta, Acta en CD.
- IPNI. 2009. <http://www.inpofos.org/ppiweb/ltams.nsf>. Revisado el 23/06/2016.
- LAVADO RS. 1983. Evaluación de la relación entre composición química del agua de lluvia y el grado de salinidad y alcalinidad en distintos suelos. Rev. Fac. Agronomía. UBA 4: 135-139.
- OBERSON A. E FROSSARD. 2005. Phosphorus management for organic agriculture. En: Phosphorus, agriculture and the environment. JT Sims, AN Sharpley (Eds), Madison, WI. Soil Science Society of America: 761-779.
- ORROÑO DI, M CHEZO, RS LAVADO. 2006. Realidad del escurrimiento de fosfatos en una cuenca típica de la región Pampeana. XX Cong. Arg. Ciencia del Suelo, Salta-Jujuy.
- RUBIO G, CR ÁLVAREZ. 2012. El fósforo desde el punto de vista agrícola. En: Fertilidad de los suelos: caracterización y manejo en la región pampeana. R Álvarez, G Rubio, CR Álvarez, RS Lavado (Eds). EFA, UBA: 351-380.

AZUFRE

Flavio H. Gutierrez Boem

En la mayoría de los suelos de regiones templado-húmedas casi todo el azufre (90-98%) está formando parte de la materia orgánica (Figura 1). Por lo tanto, las diferencias en el contenido total de S en estos suelos suelen estar directamente relacionadas con diferencias en el contenido de materia orgánica, como se observó en la región pampeana (Mizuno *et al.*, 1990, Galantini y Rosell, 1997, Galantini *et al.*, 2004). La relación C-S de la materia orgánica es de alrededor de 100:1 (Freney, 1986). En suelos calcáreos buena parte del S puede estar co-cristalizado con el CaCO_3 y, por lo tanto, una menor proporción del S se encuentra en formas orgánicas (Freney, 1986). Los suelos ácidos de zonas tropicales con alto contenido de arcillas 1:1 y óxidos de hierro y aluminio pueden acumular gran cantidad de SO_4^{2-} adsorbido. Los suelos agrícolas con pH mayor a 6 tienen muy poca capacidad de adsorber SO_4^{2-} . En el suelo, también se puede encontrar al S en la solución (como SO_4^{2-}), y en formas minerales (e.g. yeso, piritita). En suelos meteorizados prácticamente no hay S en los minerales.

Balance

Las principales vías de entrada y salida de S en sistemas agrícolas son la fertilización, el aporte con el agua de riego, la deposición atmosférica, el ascenso desde la napa, la exportación con la cosecha y la lixiviación (Figura 1).

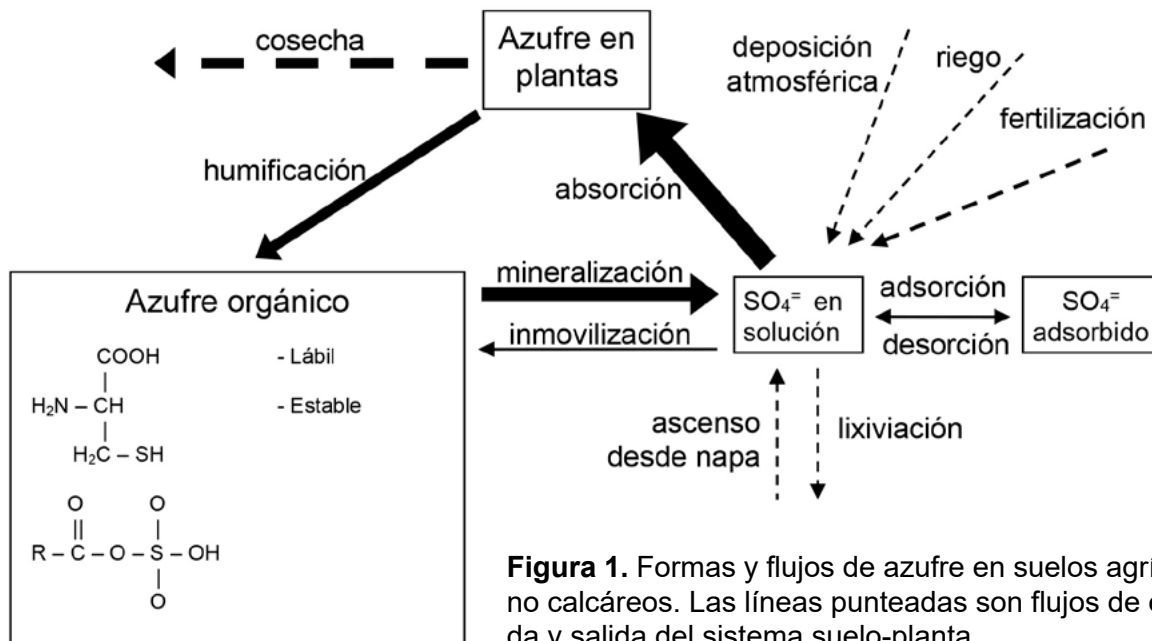


Figura 1. Formas y flujos de azufre en suelos agrícolas no calcáreos. Las líneas punteadas son flujos de entrada y salida del sistema suelo-planta.

Las lluvias y la deposición de polvo atmosférico pueden constituir vías de entrada de S en el suelo muy importantes en algunas regiones que están cercanas a fuentes de S. El S entra en la atmósfera desde diferentes fuentes, algunas naturales (como sprays marítimos, polvo, volcanes, microorganismos), y otras antrópicas (quema de combustibles fósiles, fundiciones). Buena parte de los aportes son depositados en las cercanías de la fuente, y su magnitud puede variar entre 1 y 170 kg ha⁻¹ año⁻¹ de S (Olson y Rehm, 1986). El S que entra en la atmósfera (e.g. SO₂) puede contribuir a la formación de H₂SO₄ en las gotas de lluvia, lo que produce el fenómeno conocido como lluvia ácida (pH 2,5-4,5, pH agua de lluvia: 5,6) (Noggle *et al.*, 1986). En Europa occidental, producto de la reducción de las emisiones de SO₂ por parte de las industrias y la quema de combustibles, la deposición anual de S en los suelos se redujo de 70 kg ha⁻¹ en 1970 a menos de 10 kg ha⁻¹ en 2002 (De Kok *et al.*, 2007). En zonas cercanas al mar (menos de 30 km), las lluvias pueden aportar alrededor de 3-10 kg S ha⁻¹ año⁻¹ (Edmeades *et al.*, 2005). En la región pampeana no hay muchos datos respecto de este aporte. Morrás (1983) midió un aporte de 11 kg S ha⁻¹ año⁻¹ en el oeste de la ciudad de Buenos Aires (INTA Castelar), mientras que Lavado (1983) no pudo detectar la presencia de sulfatos en el agua de lluvia 45 km al sudeste (Alejandro Korn). Más recientemente, Piñeiro *et al.* (2008) midieron un aporte de 4.6 kg S ha⁻¹ año⁻¹ en la ciudad de Buenos Aires (FAUBA), 1.2 kg S ha⁻¹ año⁻¹ en Pergamino, y 1.6 kg S ha⁻¹ año⁻¹ en San Luis.

Las aguas subterráneas pueden tener sulfatos disueltos y, tanto el aporte con el agua de riego como el posible ascenso de agua desde la napa freática cuando esta se encuentra cerca de la superficie, pueden constituir entradas de S a un sistema agrícola. En el oeste de la región pampeana, se observó que cuando la napa freática está por encima de los 2 m, los cultivos pueden absorber agua de la misma (Nosetto *et al.*, 2009). En cuanto al aporte de S con el agua de riego, depende de la concentración de S en el agua y la cantidad de agua aplicada. En general se observa que el contenido de S como sulfato en el agua varía mucho entre distintos pozos, incluso dentro de una misma localidad (Tabla 1). La principal salida de S en un sistema agrícola es la cosecha. La cantidad de S que se exporta depende de los requerimientos del cultivo y de cuanto de lo absorbido se cosecha (índice de cosecha). Tanto el requerimiento como la exportación por unidad de superficie aumentan con el rendimiento, por lo que es común expresarlo por tonelada de rendimiento. Los requerimientos de S de los cultivos son similares a los de fósforo, y mucho menores que los de nitrógeno y potasio. Por otra parte, el índice de cosecha de S en los cultivos de granos es menor que los de nitrógeno y fósforo (Tabla 2).

Tabla 1. Concentración de sulfato en aguas subterráneas en distintas localidades de la provincia de Buenos Aires (Balcaza, 2003, Pfluger, 2007, Barranquero *et al.*, 2011).

Localidad	mg S L ⁻¹
La Plata	22 - 67
Saladillo, Cañuelas, Lobos, Monte	4 - 96
Alem, Vedia	15 - 57
Tornquist	24 - 40
Tandil	1 - 18

Tabla 2. Requerimientos, índice de cosecha y exportación de S en algunos cultivos de granos. Rendimiento expresado con 12% de humedad (Duke y Reisenauer, 1986, Pedersen *et al.*, 1998, IPNI, 2009).

Cultivo	Requerimiento (kg S t ⁻¹)	Índice de cosecha	Exportación
Trigo	4	0.38	1.5
Maíz	3	0.40	1.2
Soja	6	0.50	3
Girasol	5	0.40	2
Colza	10	0.25	2.5

Tabla 3. Exportación de S con algunos cultivos hortícolas. Rendimiento expresado en peso fresco (79-96% de humedad, fuentes: TSI, SPIB, IFDC, IPNI, NCSU.).

	Exportación (kg S t ⁻¹)
Lechuga	0.50
Espinaca	0.40
Ajo	0.57
Cebolla	0.45 - 0.70
Repollo	1.0 - 1.14
Coliflor	0.60
Tomate	0.35 - 0.60
Papa	0.23 - 0.50
Zanahoria	0.33

Disponibilidad

En suelos agrícolas bien aireados, el S en la solución se encuentra en el estado de máxima oxidación, como SO_4^{2-} . Estos sulfatos están inmediatamente disponibles para su absorción por parte de las plantas. La liberación de SO_4^{2-} desde el S orgánico por mineralización es, en muchos suelos, el proceso más importante para la renovación de los SO_4^{2-} en solución. Durante una estación de crecimiento se puede liberar por mineralización un 1-5% del S orgánico total presente en el suelo (Schoenau y Malhi, 2008). Los microorganismos también pueden absorber el SO_4^{2-} de la solución del suelo. Cuando absorben más de lo que liberan, ocurre lo que se denomina inmovilización. Análogamente al nitrógeno, la inmovilización ocurre cuando se aportan al suelo materiales con una relación C:S muy alta (baja concentración de S en el residuo). En general se observa que se libera S de los materiales orgánicos que tienen una relación C:S menor a 200, mientras que el S es inmovilizado cuando esta relación es mayor a 400. La Tabla 4 muestra la relación C:S para varios materiales orgánicos.

Se cuenta con varios métodos para evaluar la disponibilidad de S en los suelos. Una manera de evaluar la disponibilidad es cuantificar la concentración de sulfatos en el suelo, ya que esta es la forma inmediatamente disponible para las plantas. Para extraer sulfatos del suelo se pueden utilizar numerosos extractantes, entre ellos agua y soluciones salinas diluidas (0,01-0,1M CaCl_2 , LiCl o KCl). Estos extractantes extraen los sulfatos solubles, no los sulfatos adsorbidos. Para extraer ambos, se pueden utilizar soluciones con aniones que pueden desplazar a los sulfatos adsorbidos, por ejemplo: NaHCO_3 (0,5M), NH_4OAc

(0,5-1M), $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ o KH_2PO_4 (500 mg P L⁻¹) (Johnson y Fixen, 1990, Tabatabai, 1996). También se han desarrollado varios métodos para intentar incluir al S orgánico lábil en la evaluación de la disponibilidad de S (Lisle *et al.*, 1994, Watkinson y Kear, 1994).

Tabla 4. Relación C:S de varios materiales orgánicos (Eriksen *et al.*, 1998, Barbazán *et al.*, 2011).

Materiales orgánicos	Relación C:S
Compost	78
Alfalfa	310
Soja (rastrajo)	498
Maíz (rastrajo)	2020
Aserrín	1210 - 11000

En la región pampeana se han realizado varios intentos de desarrollar métodos de diagnóstico de la disponibilidad de S basados en el análisis de suelo. Los resultados de la mayoría de las redes de ensayos realizadas hasta ahora mostraron una falta de relación entre la respuesta del cultivo a la fertilización y la concentración de sulfatos en el suelo a la siembra, u otras variables de suelo (materia orgánica, textura) y de manejo (años de agricultura) (Echeverría *et al.*, 2002, Gentiletti y Gutierrez Boem, 2004, Ferraris *et al.* 2005).

En general, en zonas templado-húmedas se ha observado que las deficiencias de S tienen mayor probabilidad de ocurrencia en cultivos de alto rendimiento realizados en suelos con bajos niveles de materia orgánica (Johnson, 1987). Esto está relacionado con que en zonas húmedas los sulfatos provienen principalmente de la mineralización de la materia orgánica. La menor mineralización de S orgánico de un suelo también puede estar relacionada con su historia de uso. Largos períodos de cultivo o pérdidas por erosión causan caídas en los contenidos de materia orgánica (y de sus fracciones lábiles), disminuyendo la capacidad del suelo de proveer S a un cultivo. No es casualidad que, dentro de la región pampeana, haya sido en el centro sur de Santa Fe donde primero se empezaron a manifestar deficiencias de S con frecuencia (Martinez y Cordone, 1998). Esta es una zona con suelos que han tenido un uso agrícola continuo durante años, en muchos casos con pérdidas de suelo por erosión.

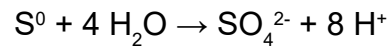
En resumen, a diferencia de lo que ocurre con P, en la región pampeana no se puede predecir la respuesta de un cultivo a la fertilización azufrada basado en el análisis de suelo. Por ahora, la decisión de fertilizar o no un cultivo con azufre se debería basar en:

1. los antecedentes en la zona: evidencia experimental de la ocurrencia de deficiencias azufradas (i.e. ensayos con respuestas positivas al agregado de azufre, frecuencia de estos casos).
2. la historia de uso de suelo: en suelos degradados, o con un largo uso agrícola continuo aumentan las probabilidades de respuesta.
3. la expectativa de rendimiento: mayores rendimientos implican mayores requerimientos nutricionales y probabilidades de respuesta.

Fuentes de S

Existen varias fuentes minerales de S permitidas para producción orgánica (Tabla 5). Entre las inorgánicas, hay varias sales con sulfato y el azufre elemental. Las sales con sulfato son sales neutras y el azufre está en una forma disponible para las plantas. En el caso

del azufre elemental, este no está en una forma inmediatamente disponible y debe oxidarse a sulfato en el suelo para que lo puedan absorber las plantas.



Esta reacción la llevan a cabo bacterias y hongos presentes en el suelo. La velocidad de esta oxidación depende del tamaño de partícula y condiciones ambientales (temperatura, humedad y población microbiana), por lo que sólo queda rápidamente disponible si está finamente molido (<150-200µm). Debido a su reacción ácida, también se lo utiliza como enmienda para disminuir el pH del suelo.

Tabla 5. Fuentes minerales de azufre.

	Fórmula y solubilidad en agua (20°C, g L ⁻¹)		S (%)
Sulfato de Calcio (Yeso)	CaSO ₄ ·2H ₂ O	2	15-17
Sulfato de Magnesio (Kieserita)	MgSO ₄ ·H ₂ O	417	20-22
(sal de Epsom)	MgSO ₄ ·7H ₂ O	710	13
Sulfato de Potasio y Magnesio	K ₂ SO ₄ ·2MgSO ₄		23
(Langbeinita)	K ₂ SO ₄ ·MgSO ₄ ·6H ₂ O	230	16
Azufre elemental	S ⁰	insoluble	80-90

Se pueden utilizar también materiales orgánicos como fuente de S. Su contenido de S es mucho menor que las sales inorgánicas, y más variable (Tabla 6).

Tabla 6. Fuentes orgánicas de S y materiales no compostados (Barbazán *et al.*, 2011).

	S* (%)		
	n	media	desvío estándar
Compost	24	0.26	0.2
Aserrín	5	0.04	0.03
Turba		0.47	
Turba		0.04	
Materiales no compostados:			
Estiércol vacuno	3	0.15	0.04
Estiércol gallina	5	0.32	0.09
Cama de pollo (arroz)	13	0.29	0.09
Cama de pollo (aserrín)	4	0.25	0.13

* determinado en muestras secas

Bibliografía

- BALCAZA LF. 2003. Deterioro de los suelos cultivados bajo invernáculo. IDIA XXI no.4: 196-200.
- BARBAZAN M, A DEL PINO, C MOLTINI, J HERNANDEZ, J RODRIGUEZ. 2011. Caracterización de materiales orgánicos aplicados en sistemas agrícolas intensivos de Uruguay. *Agrociencia Uruguay* 15: 82-92.

- BARRANQUERO RS, M VARNI, A RUIZ DE GALARRETA, R BANDA NORIEGA. 2011. Evaluación de las características del agua subterránea en la cuenca del arroyo Languyú, Tandil, Buenos Aires, Argentina. Instituto de Hidrología de Llanuras, UNICEN-CIC, Azul.
- DE KOK LJ, M DURENKAMP, L YANG, I STULEN. 2007. Atmospheric sulfur. En: M.J. Hawkesford y L.J. De Kok (eds) *Sulfur in Plants - an Ecological Perspective*, Springer, pp. 91-106.
- DUKE SH, HM REISENAUER. 1986. Roles and requirements of sulfur in plant nutrition. En M.A. TABATABAI (ed.), *Sulfur in agriculture*, ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, USA, pp. 123-168.
- ECHEVERRIA E, G FERRARIS, G GERSTER, FH GUTIERREZ BOEM, F SALVAGIOTTI. 2002. Fertilización en soja y trigo - soja: respuesta a la fertilización en la región pampeana resultados de la red de ensayos del proyecto fertilizar - INTA Campaña 2000/2001 y 2001/2002. EEA INTA Pergamino, 44 p
- EDMEADES DC, BS THORROLA, AC ROBERTS. 2005. The diagnosis and correction of sulfur deficiency and the management of sulfur requirements in New Zealand pastures: a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 45: 1205-1223.
- ERIKSEN J, MD MURPHY, E SCHNUG. 1998. The soil sulphur cycle. En E. SCHNUG (ed.), *Sulphur in Agroecosystems*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 39-73.
- FERRARIS G, FH GUTIERREZ BOEM, P PRYSTUPA, F SALVAGIOTTI, L COURETOT, D DIGNANI. 2005. Fertilización azufrada en maíz en la Pampa Ondulada. VIII Congreso Nacional de maíz, Rosario, Noviembre.
- FRENEY JR. 1986. Forms and reactions of organic sulfur compounds in soils. En M.A. TABATABAI (Ed), *Sulfur in agriculture*, ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, USA.
- GALANTINI JA, RA ROSELL. 1997. Organic fractions, N, P and S changes in an Argentine semiarid Haplustoll under different crop sequences. *Soil & Tillage Research* 42: 221-228.
- GALANTINI JA, N SENESI, G BRUNETTI, R ROSELL. 2004. Influence of texture on organic matter distribution and quality and nitrogen and sulphur status in semiarid Pampean grassland soils of Argentina. *Geoderma* 123: 143-152.
- GENTILETTI A, FH GUTIERREZ BOEM. 2004. Fertilización azufrada del cultivo de soja en el centro-sur de Santa Fe. *Informaciones Agronómicas (INPOFOS)*, diciembre, no. 24, pp. 12-14
- IPNI (International Plant Nutrition Institute). 2009. *CalReq, Cálculo de Requerimientos Nutricionales en Cultivos de Cereales, Oleaginosas, Industriales y Forrajeros*.
- JOHNSON GV. 1987. Sulfate: sampling, testing and calibration. En J.R. BROWN (ed.) *Soil testing: sampling, correlation, calibration, and interpretation*. SSSA, Madison, WI, USA, pp. 89-96.
- JOHNSON GV, PE FIXEN. 1990. Testing soils for sulfur, boron, molybdenum and chlorine. En: R.L. WESTERMAN (ed.) *Soil testing and plant analysis*. SSSA, Madison, WI, USA, pp.265-273.
- LAVADO RS. 1983. Evaluación de la relación entre composición química del agua de lluvia y el grado de salinidad y sodicidad de distintos suelos. *Rev. Fac. Agron. UBA*, 4: 135-139.
- LISLE L, R LEFROY, G ANDERSON, G BLAIR. 1994. Methods for the measurement of sulphur in plants and soil. *Sulphur in Agriculture* 18: 45-54.

- MARTINEZ F, G CORDONE. 1998. Resultados de ensayos de fertilización azufrada en soja. Soja, campaña 97/98, INTA EEA Oliveros, pp. 53-57
- MIZUNO I, B DE LAFAILLE, LG DE LOPEZ CAMELO. 1990. Caracterización del azufre en algunos Molisoles de la provincia de Buenos Aires. *Ciencia del Suelo* 8: 111-117.
- MORRAS HJM. 1983. Composición química de las aguas de lluvia en el área de Castelar (provincia de Buenos Aires). *IDIA* 409-412: 24-29.
- NOGGLE JC, JF MEAGHER, US JONES. 1986. Sulfur in the atmosphere and its effects on plant growth. En M.A. TABATABAI (ed.), *Sulfur in agriculture*, ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, USA.
- NOSETTO MD, EG JOBBAGY, RB JACKSON, GA. SZNAIDER. 2009. Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field Crops Research* 113:138-148.
- OLSON RA, GW REHM. 1986. Sulfur in precipitation and irrigation waters and its effects on soils and plants. En M.A. TABATABAI (ed.), *Sulfur in agriculture*, ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, USA.
- PEDERSEN CA, L KNUDSEN, E SCHNUG. 1998. Sulphur fertilisation. En E. SCHNUG (ed.), *Sulphur in Agroecosystems*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 115-134.
- PFLUGER JC. 2007. El agua potable en la república argentina. Diagnóstico de fuentes de agua en algunas localidades. 196p.
- PIÑEIRO G, EG JOBBAGY, RB JACKSON, CS SANTONI, SI PORTELA, CM DI BELLA. 2008. ¿Qué nos trae la lluvia? Cuantificando las deposiciones atmosféricas de cationes y aniones en la cuenca del Río de la Plata. Resúmenes de la XXIII Reunión Argentina de Ecología, 25 al 28 de Noviembre, San Luis, Argentina. Pedersen *et al.*, 1998;
- SCHOENAU JJ, SS MALHI. 2008. Sulfur forms and cycling processes in soil and their relationship to sulfur fertility. En: J. Jez (ed.), *Sulfur: a missing link between soils, crops, and nutrition*. Agronomy monograph 50, ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, pp. 1-10.
- TABATABAI MA. 1996. Sulfur. En D.L. SPARKS (ed.) *Methods of soil analysis, Part 3, Chemical methods*, SSSA, Madison, WI, USA, pp. 921-960.
- WATKINSON JH, MJ KEAR. 1994. Test for available sulphur in New Zealand pastoral soils based on mineralizable organic sulphur. *Sulphur in Agriculture* 18: 9-12.

POTASIO, CALCIO Y MAGNESIO

Flavio H. Gutierrez Boem

Formas de potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg) en el suelo

El origen de estos tres nutrientes es el material original a partir del cual se formó el suelo. A diferencia de otros nutrientes (i.e. N, P, S) el K, Ca y Mg no están presentes en la materia orgánica del suelo. En orden de mayor a menor disponibilidad para las plantas, las formas de estos nutrientes en el suelo son: solución, adsorbidos a la fase sólida (inorgánica y orgánica), fijado (sólo K), precipitado (sólo Ca), y estructural (minerales primarios). La forma estructural es la más abundante en el suelo (90-99%), pero no está disponible para los cultivos. Los cultivos absorben estos nutrientes de la solución del suelo, y la principal vía de renovación es la desorción a partir de las formas adsorbidas (intercambiables). Este es el motivo por el cual habitualmente se consideran disponibles sólo estas dos formas en el suelo (solución y adsorbido o intercambiable). (Tabla 1)

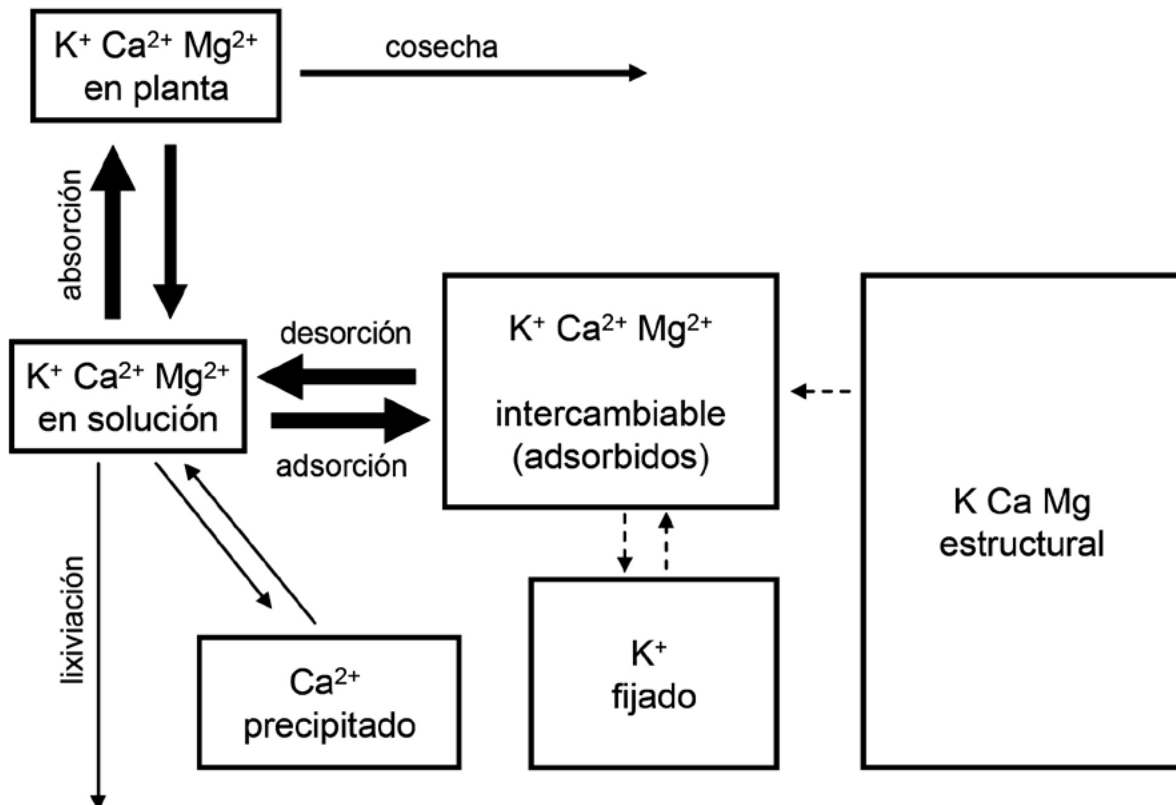


Figura 1. Formas de K, Ca y Mg en el suelo y planta.

El K, Ca y Mg están presentes en la solución como cationes (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}), que pueden ser adsorbidos por la fase sólida (que presenta cargas negativas permanentes o variables). La capacidad que tienen los suelos de adsorber cationes se llama CIC (capacidad de intercambio catiónico) y está dada por la cantidad y tipo de arcilla, y materia orgánica presente en el suelo. Los cationes adsorbidos están en rápido equilibrio con los de la solución, por lo que a mayor cantidad de cationes adsorbidos, mayor es la capacidad del suelo de mantener la concentración de esos cationes en la solución. Cuando un cultivo absorbe K, baja la concentración de este ión en la solución, y provoca la liberación de K adsorbido hacia la solución. Cuando se agrega un fertilizante soluble al suelo (e.g. KCl), aumenta la concentración de K en la solución, y buena parte de ese K es rápidamente adsorbido por la fase sólida. El catión más abundante en la CIC es el Ca, seguido del Mg y luego del K. Por ejemplo, un Argiudol típico de la pampa ondulada puede tener un 60% de la CIC saturada con Ca, 5.8% con Mg y 2.4% con K (INTA, 1972). Debido a esta interacción con la fase sólida (adsorción-desorción), se considera a estos nutrientes como poco móviles en el suelo. El K es requerido en grandes cantidades por los cultivos (similares al N), mientras que el Ca y el Mg son requeridos en menor cantidad (similar al P y S).

Requerimientos, adquisición y exportación de K, Ca y Mg

La concentración de K en la solución es muy variable. Un rango común en suelos agrícolas es 8-40 mg L⁻¹, aunque en suelos deficientes en K es más común observar valores de 2-6 mg L⁻¹ (Barber, 1995). Dado los altos requerimientos de K de la mayoría de los cultivos, la cantidad de K que llega a las raíces con el agua absorbida (flujo masal) no alcanza a cubrir una parte importante de los requerimientos (i.e. <10%). Por lo tanto, la mayor parte del K llega a las raíces por difusión, un mecanismo que causa movimientos a muy cortas distancias. En 30 días, el K se puede mover unos 5 mm por difusión (7 mm en 60 días). Esto hace que la capacidad de un cultivo de absorber K de un suelo depende de la extensión de su sistema radical, ya que sólo puede absorber K del suelo que está en torno a sus raíces.

Los valores más comunes de Ca y Mg en la solución de suelos de zonas templado húmedas son de 20-40 mg L⁻¹ (Barber, 1995). Dado los bajos requerimientos de estos dos nutrientes en la mayoría de los cultivos, en general, la cantidad que llega a las raíces por flujo masal es suficiente para cubrirlos. La exportación de estos nutrientes es relativamente baja en los cultivos de granos, dado que el índice de cosecha de los mismos es bajo (comparado con N o P). Si el órgano cosechado es otro, o se cosecha toda la parte aérea, la exportación puede ser muy importante, en particular de K (Tabla 1).

Tabla 1. Requerimientos, índice de cosecha y exportación de K, Ca y Mg en cultivos de granos.

	Requerimientos			Índice de cosecha			Exportación		
	kg t ⁻¹						kg t ⁻¹		
Cultivo	K	Ca	Mg	K	Ca	Mg	K	Ca	Mg
Trigo	17	2.6	3.5	0.21	0.14	0.63	3.5	0.4	2.2
Maíz	17	3	3	0.21	0.07	0.50	3.5	0.2	1.5
Soja	34	14	8	0.41	0.20	0.40	14	2.8	3.2
Girasol	26	16	10	0.19	0.08	0.28	4,9	1.2	2.8
Colza	46	24	7	0.21	0.10	0.42	10	2.6	3

Rendimiento expresado con 12% de humedad (CCC 2013, IPNI 2016, USDA 2016a, 2016b).

Tabla 2. Exportación con algunos cultivos hortícolas (kg t⁻¹). Rendimiento expresado con humedad comercial (77-96%) (IPNI 2016, USDA 2016a, 2016b).

	K	Ca	Mg
Lechuga	2.3-6.8	0.35-0.9	0.13-0.28
Espinaca	5.6	0.99	0.79
Tomate	2.3-3.3	0.10-0.17	0.11-0.27
Cebolla	0.9-1.8	0.23-0.29	0.04-0.10
Ajo	4	1.8	0.25
Zapallo	2.6-3.4	0.15-0.21	0.12-0.17
Papa	4.3-5.4	0.12-0.17	0.23

Evaluación de la disponibilidad

Para evaluar la disponibilidad de K (Ca o Mg) se desplaza el K del suelo con otro catión (NH_4^+), utilizando una solución de acetato de amonio (1M NH_4OAc). A la cantidad extraída, se le descuenta la fracción soluble, y se la denomina intercambiable. Como en los suelos no salinos la cantidad de cationes en solución es mínima (comparada con la intercambiable), se la puede ignorar (Helmke y Sparks, 1996).

En la región pampeana no se cuenta con valores críticos de K intercambiable para los cultivos, porque no hay suelos con baja disponibilidad y, por lo tanto, respuesta al agregado de K. Estos sitios son indispensables para establecer relaciones entre la disponibilidad de un nutriente en el suelo y la respuesta de un cultivo al agregado de ese nutriente. A partir de estas relaciones es que se pueden establecer valores de disponibilidad por debajo de los cuales el crecimiento del cultivo se ve afectado (i.e. valor crítico). A título informativo, en otras zonas agrícolas del mundo con suelos similares a la región pampeana, no se recomienda fertilizar con K cuando el suelo tiene más de 170 ppm de K intercambiable (Sawyer *et al.*, 2008). En una base de datos de más de 20000 muestras de suelos de la región pampeana, el 95% tenía más de 400 ppm de K intercambiable (mediana=690ppm) (Correndo y García, 2011) (Figura 2).

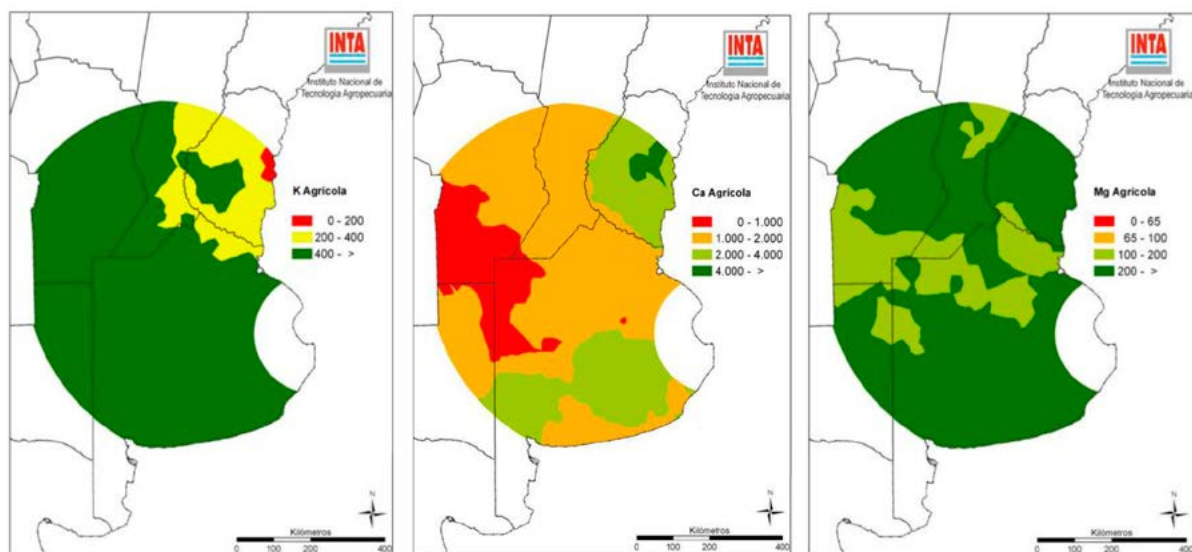


Figura 2. K, Ca y Mg intercambiable (mg kg^{-1} , 0-20 cm) en suelos de la región pampeana (Sainz Rozas *et al.*, 2013).

Las deficiencias de Mg son poco frecuentes, y no hay valores críticos para Mg calibrados localmente. En otras zonas agrícolas del mundo se utilizan valores críticos desde 30 ppm para suelos arenosos a 50 ppm para suelos limosos y arcillosos. También se puede expresar el valor crítico como porcentaje de la CIC saturada con Mg, y se considera que un 5% de la CIC saturada con Mg es suficiente para la mayoría de los cultivos (Habi *et al.*, 1990).

En el caso del Ca, es raro que se presente una deficiencia de este nutriente, dado que es el catión predominante en la CIC, y que los requerimientos de la mayoría de los cultivos son bajos. Sólo en suelos ácidos ($\text{pH} < 5.5$), donde la saturación de la CIC con bases es baja, se podrían presentar deficiencias de Ca pero, en suelos ácidos, la toxicidad de Al y Mn frecuentemente se presenta antes que la deficiencia de Ca. Por otro lado, al corregir la acidez con enmiendas (e.g. CaCO_3) se agrega Ca, por lo que es difícil separar el efecto por agregado de nutriente del de corrección de acidez. Sólo en algunos cultivos con altos requerimientos de Ca (e.g. leguminosas) se han observado respuestas al agregado de Ca en la región pampeana (e.g. alfalfa y soja en el centro de Santa Fe). También puede haber respuesta al agregado de Ca en algunos cultivos intensivos que tienen altos requerimientos de Ca durante la formación de los frutos (e.g. tomate, manzana, pera).

Fuentes de K, Ca y Mg para la agricultura orgánica

Existen varios minerales naturales (sales) permitidos para producción orgánica que se pueden utilizar como fuentes de K, Ca o Mg (Tabla 3).

Tabla 3. Fuentes minerales de K, Ca y Mg.

	Fórmula y solubilidad en agua (20°C, g L ⁻¹)	K Ca Mg		
		%		
Sulfato de Potasio	K_2SO_4	111	40	
Sulfato de Potasio y Magnesio (Langbeinita)	$\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{MgSO}_4$ $\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	230	18	10
Sulfato de Magnesio (Kieserita) (sal de Epsom)	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	417		15
Sulfato de Calcio (Yeso)	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	2	22	
Carbonato de Calcio (Calcita)	CaCO_3	0.015	36	
Carbonato de Calcio y Magnesio (Dolomita)	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	0.008	24	12

Se pueden utilizar también materiales orgánicos (residuos vegetales o animales compostados) que pueden ser fuente de estos nutrientes, aunque su concentración de nutrientes es mucho menor que el de las sales inorgánicas, y más variable (Tabla 4).

Tabla 4. Fuentes orgánicas de K, Ca y Mg, y materiales no compostados. * determinado en muestras secas, promedio y (desvío estándar), Barbazán *et al.* (2011).

	g kg ⁻¹ *			
	n	K	Ca	Mg
Compost	24	4.9 (3.7)	13.3 (9.5)	2.5 (1.7)
Aserrín	5	0.4 (0.4)	1.3 (1)	0.2 (0.1)
Turba		1.8	40.2	1.2
Turba		0.1	1.8	1.0
Materiales no compostados:				
Estiércol vacuno	3	4.1 (2.3)	9 (3.8)	3 (1.2)
Estiércol gallina	5	10.5 (5.2)	40 (12.7)	5,9 (0.4)
Cama de pollo (arroz)	13	9.3 (4.6)	23.3 (6.3)	3.8 (1.1)
Cama de pollo (aserrín)	4	5 (2.8)	20.3 (9)	2.9 (1.5)

Bibliografía

- BARBAZAN M, A DEL PINO, C MOLTINI, J HERNANDEZ, J RODRIGUEZ. 2011. Caracterización de materiales orgánicos aplicados en sistemas agrícolas intensivos de Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 15: 82-92.
- BARBER SA. 1995. *Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach*, 2nd ed., J Wiley & Sons, NY, 401 p.
- CCC. 2013. Canola Council of Canada. *Canola encyclopedia*. <http://www.canolacouncil.org/canola-encyclopedia/>. Revisado 23/06/2016
- CORRENDO AA, FO GARCIA. 2011. Relevamiento de fertilidad de suelos: base de datos ASP Argentina 1995-2003. *Actas Simposio Fertilidad 2011*, pp. 268-275.
- HABI VA, MP RUSELLE, EO SKOGLEY. 1990. Testing soils for potassium, calcium and magnesium. En: RL WESTERMAN (Ed) *Soil testing and plant analysis*, 3rd ed., SSSA, pp. 181-227.
- HELMKE PA, DL SPARKS. 1996. Lithium, sodium, potassium, rubidium and cesium. En: D.L. Sparks (Ed), *Methods of soil analysis, part 3, chemical methods*, SSSA, pp. 551-574.
- INTA. 1972. *Carta de suelos de la república argentina*. Pergamino.
- IPNI. 2016. International Plant Nutrition Institute. *Planilla de cálculo de requerimientos nutricionales*. Revisado 23/06/2016
- SAINZ ROZAS H, M EYHERABIDE, HE ECHEVERRIA, P BARBIERI, H ANGELINI, GE LARREA, GN FERRARIS, M BARRACO. 2013. ¿Cuál es el estado de la fertilidad de los suelos argentinos? En: FO GARCIA, AA CORRENDO (Eds). *Simposio Fertilidad 2013: nutrición de cultivos para la intensificación productiva sustentable*: 62-72 pp.
- SAWYER JE, AP MALLARINO, R KILLORN, SK BARNHART. 2008. *A General Guide for Crop Nutrient and Limestone Recommendations in Iowa*. Iowa State University, University Extension, 21p.
- USDA. 2016a. United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, National Nutrient Database for Standard Reference (<https://ndb.nal.usda.gov/ndb/nutrients/index>). Revisado 23/06/2016
- USDA. 2016b. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Nutrient content of crops (<http://plants.usda.gov/npk/main>). Revisado 23/06/2016

CAPÍTULO 10

MICRONUTRIENTES

Flavio H. Gutierrez Boem

Se llama micronutrientes a ocho elementos minerales esenciales para las plantas superiores: Zinc (Zn), Hierro (Fe), Cobre (Cu), Manganeseo (Mn), Boro (B), Cloro (Cl), Molibdeno (Mo) y Níquel (Ni). Para que un elemento sea considerado esencial las plantas deben ser incapaces de completar su ciclo en ausencia de ese elemento, su función no puede ser cumplida por otro elemento (irreemplazable), debe estar directamente involucrado en el metabolismo de las plantas (e.g. componente), o ser requerido para un paso metabólico determinado (Arnon y Stout, 1939).

Existen algunos elementos que no son esenciales pero se consideran benéficos porque son esenciales sólo para algunas especies, o estimulan el crecimiento pero no son esenciales. Por ejemplo, el Cobalto (Co) estimula el crecimiento de las leguminosas porque es un elemento esencial para los rizobios fijadores de N asociados con las leguminosas, el Sodio (Na) es esencial para algunas especies, y el Silicio (Si) y Selenio (Se) estimulan el crecimiento de algunas especies.

Lo que tienen en común los micronutrientes es su baja concentración en los tejidos vegetales (e.g. 0.1 - 100 ppm; 100 ppm = 0.01%), por lo que sus requerimientos se expresan en gramos de nutriente por tonelada de producto, en vez de kilogramos de nutriente por tonelada de producto como se hace con los macronutrientes (Tabla 1).

Si bien los requerimientos de las plantas deben ser satisfechos para que puedan crecer, no hay que perder de vista que estos se cubren con pequeñas cantidades, y que el exceso de algunos de estos nutrientes puede tener efectos tóxicos (Figura 1). Por ejemplo, el Mn puede alcanzar niveles tóxicos en suelos ácidos, el B en zonas áridas en suelos con material original rico en B o por uso de agua de riego con altos niveles de este elemento (más de 1-4 mg L⁻¹), y el Cl en suelos salinos o por uso de agua de riego con sales.

También existen suelos con niveles excesivos de Cu o Zn, sea por acumulación en el suelo por uso reiterado de productos fitoterápicos (i.e. Cu) o por residuos de actividades industriales.

Tabla 1. Concentración* de micronutrientes en los productos de cosecha de varios cultivos (g t⁻¹). (*) en base húmeda (IPNI, 2016, USDA, 2016, Mitchell, 1999, Murrell, 2005, Zublena, 1991, Bell y Dell, 2008, Kabata-Pendias, 2011).

	Fe (g t ⁻¹)	Mn (g t ⁻¹)	Zn (g t ⁻¹)	Cu (g t ⁻¹)	Cl (g t ⁻¹)	B (g t ⁻¹)	Mo (g t ⁻¹)
Granos							
trigo	32-120	38-44	26-33	1.3-4.5	500	11-15	0.8
maíz	21-27	4.8	20-22	3.1	210	12	0.04-0.2
soja	150-170	20-25	17-49	16	100	10-20	4
girasol	30-52	10-19	40-50	10-18		32	10
Hortalizas							
lechuga	8-12	1.7-2.5	1.7-3	0.2	32		0.005
espinaca	24-27	3.5-9	2-5.3	0.5-1.3		3.9	0.5
tomate	2.7	1.1	1.7	0.6-2.3		0.4	0.02-0.04
cebolla	2.1	1.2-2.6	1.7	0.4-3.5	65	1.1	0.01-0.02
ajo	17	16	11	2.9	53-245		
zapallo	4-8	1.2-1.5	2.9-3.2	1-1.2			
papa	3.4-8.1	0.4-1.5	3	0.6-1.4	130-140	1.2-2.7	0.05-0.1
Frutales							
manzana	1.2	0.2-0.4	0.2-0.4	0.27		1.3	0.002
naranja	8		1.1	0.5		1.1	0.014

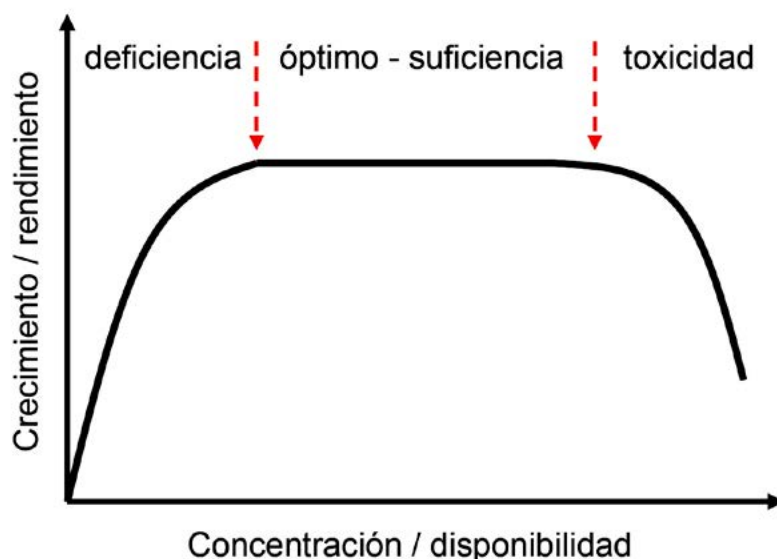


Figura 1. Relación esquemática entre el crecimiento y la disponibilidad de micronutrientes.

Formas en el suelo y factores que afectan la disponibilidad

Los metales Fe, Mn, Zn, Cu, Ni están presentes en el suelo como cationes, y tienen en común que su disponibilidad aumenta cuando baja el pH de los suelos. Interaccionan con la fase sólida del suelo de diversas formas, por lo que su concentración en la solución del suelo es baja, y son poco móviles en el suelo. En la solución del suelo pueden estar presentes como quelatos o cationes libres.

Tanto el Fe como el Mn son muy abundantes en la mayoría de los suelos. Su concentración en la solución del suelo está regulada por reacciones de precipitación-solubilización. En el suelo están presentes como óxidos e hidróxidos, y su solubilidad aumenta cuando baja el pH. También pueden unirse a la materia orgánica. Su disponibilidad disminuye cuando el pH del suelo sube, y los casos de deficiencias suelen estar asociados a pH altos (pH > 7.5), lo cual es común en suelos calcáreos. El anegamiento puede afectar su disponibilidad, ya que la solubilidad de sus formas reducidas (Fe^{2+} , Mn^{2+}) es mucho mayor que la de sus formas oxidadas (Fe^{3+} , Mn^{4+}). Estas últimas son las que predominan en suelos agrícolas bien drenados. Puede haber toxicidad por exceso de Mn en suelos ácidos (pH < 5.5), o inundados.

El Zn está en la solución del suelo en bajas concentraciones, como catión (Zn^{2+}) o quelato. Puede precipitar en forma de óxidos, unirse a la materia orgánica o ser adsorbido por las arcillas (Storey, 2006). Es el micronutriente que más frecuentemente se han reportado deficiencias a nivel mundial (Alloway, 2008). La deficiencia puede estar asociada a un simple bajo contenido total en el suelo, o a condiciones particulares como alto pH (>7.5) y presencia de CaCO_3 en suelos calcáreos o de bicarbonato (HCO_3^-) en agua de riego, formación de complejos orgánicos en suelos con alto contenido de materia orgánica o por agregado de abonos orgánicos, y suelos con alta disponibilidad de P. El maíz es un cultivo particularmente sensible a deficiencias de Zn.

El Cu es inmóvil en el suelo, ya que interacciona fuertemente con la materia orgánica y forma complejos estables con ácidos orgánicos. Si los ácidos orgánicos son de bajo peso molecular, puede estar presente en la solución del suelo como quelato (Kopsell y Kopsell, 2006). Son raros los casos de deficiencia de Cu, en general asociados a suelos arenosos, orgánicos (materia orgánica > 10%), o con pH alto (pH > 7.5). Puede disminuir su disponibilidad por encalado, o agregado materia orgánica al suelo (Bell y Dell, 2008). Los cereales de invierno son sensibles a la deficiencia de Cu (e.g. trigo, cebada).

Respecto del Ni, aún no se han identificado suelos deficientes en este nutriente. Los requerimientos son tan bajos, que no es raro que la deposición atmosférica supere la exportación en muchos cultivos (Brown, 2006).

El Cl y el B tienen en común que interaccionan poco con la fase sólida (i.e. son poco adsorbidos), su disponibilidad es poco afectada por el pH del suelo, y están sujetos a pérdidas por lixiviación.

El Cl como cloruro (Cl^-) es móvil en el suelo, y se requiere que haya una reposición vía lluvias, ascenso de napas, agua de riego o meteorización para que se renueve su contenido en la solución del suelo (Heckman, 2006). En suelos de zonas húmedas, arenosos, lejos del mar, y donde no se utilice KCl como fertilizante, se pueden presentar deficiencias en cultivos sensibles (e.g. trigo) (Bell y Dell, 2008).

La renovación del B de la solución del suelo depende de la descomposición de los residuos vegetales (y muerte de la biomasa microbiana) (Pais y Benton Jones, 1997). En la solución, la forma que predomina es el ácido bórico no disociado (H_3BO_3 , $\text{pK}_a=9.2$), sin carga, que no es adsorbido por la fase sólida, por lo que está sujeto a pérdidas por lixiviación. En una pequeña proporción hay borato (H_2BO_3^-), que puede ser adsorbido a las arcillas y a la materia orgánica. La proporción de borato aumenta en la medida que aumenta el pH del suelo (Gupta, 2006). Las deficiencias de B han sido reportadas en zonas con suelos arenosos, con bajo contenido de materia orgánica, en cultivos sensibles (e.g. girasol).

El Mo en el suelo está presente como molibdato (MoO_4^{2-}), y aumenta su disponibilidad con el aumento del pH del suelo. El molibdato puede ser fuertemente adsorbido por los óxi-

dos de hierro y aluminio presentes en el suelo (como el P) (Hamlin, 2006). Los casos de deficiencias se presentan en suelos ácidos, o suelos arenosos muy lixiviados (Bell y Dell, 2008).

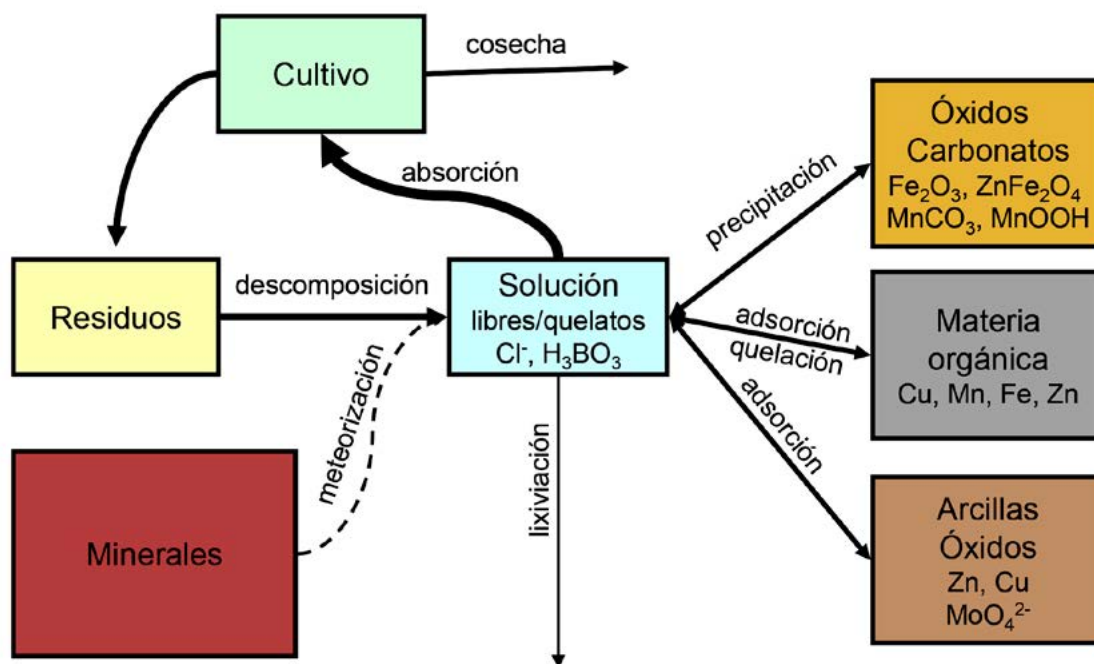


Figura 2. Principales formas y flujos de micronutrientes en suelo y cultivo.

Evaluación de la disponibilidad

La disponibilidad de micronutrientes se puede evaluar mediante el análisis del suelo, o el análisis vegetal.

En cuanto al análisis de suelo, el B y Cl pueden ser extraídos con agua o soluciones salinas diluidas, ya que no interactúan fuertemente con la fase sólida. El extractante más común para Mo es el oxalato de amonio, que extrae el Fe y Al amorfo en el suelo, sobre los cuales el Mo está adsorbido. Para Fe, Mn, Zn y Cu el extractante más común es un agente quelante (DPTA, EDTA, Mehlich 3 que incluye EDTA). Al unirse al metal y reducir su actividad en la solución, estos extractantes provocan la liberación del metal de fracciones lábiles que están en rápido equilibrio con la solución (Figura 3). De esta manera, los quelantes estiman tanto la cantidad de nutriente en la solución como también la unida a fracciones en equilibrio dinámico con la solución.

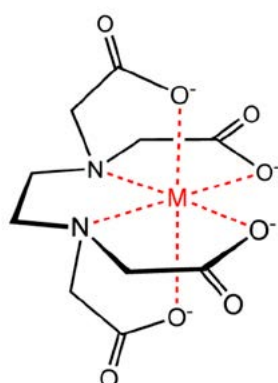


Figura 3. Quelato Metal-EDTA. EDTA: ácido etilendiaminotetraacético, M: catión metálico, N: grupo amino, =O -O: grupos carboxilo, líneas punteadas: uniones quelato-metal.

Para que los valores medidos tengan valor diagnóstico, estos métodos deben ser calibrados localmente, ya que hay características del suelo que pueden afectar el resultado (e.g. pH, poder buffer). Mientras no se realice ese trabajo, los valores de la literatura internacional sólo deben ser considerados orientativos (Tabla 2). Lo mismo se puede afirmar respecto del análisis vegetal, donde el resultado puede ser afectado por el órgano muestreado, y el momento de muestreo. La información internacional disponible sólo sirve a título informativo.

En la región pampeana se ha observado que el uso agrícola del suelo ha disminuido el contenido de algunos micronutrientes (Zn y B), mientras que no afectó el de otros (Cu, Mn y Fe) (Sainz Rozas *et al.*, 2013).

Tabla 2. Valores críticos de micronutrientes en suelo (Johnson y Fixen, 1991, Pais y Benton Jones, 1997, Martens y Lindsay, 1991).

Nutriente	método	valores críticos mg kg ⁻¹	
		deficiencia	exceso
Cinc (Zn)	DTPA	0.2 - 2.0	10 -20
Hierro (Fe)	DTPA	2.5 - 5.0	
Manganeso (Mn)	DTPA	1.0 - 5.0	150 - 200
Cobre (Cu)	DTPA	0.1 - 2.5	
Molibdeno (Mo)	Oxalato NH ₄	0.1 - 0.3	
Boro (B)	agua caliente	0.1 -1.0	3 - 5
Cloro (Cl)	agua	9	

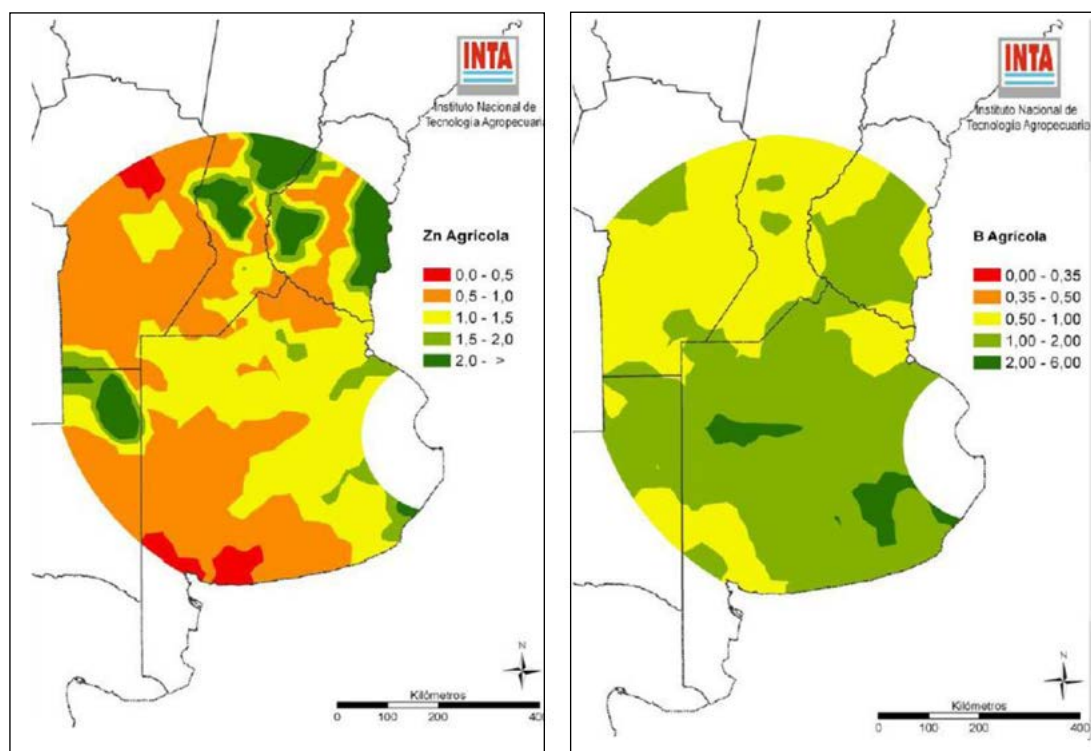


Figura 4. Concentración de Zn (DPTA) y B (agua caliente) en suelos agrícolas de la región pampeana (0-20 cm). Los colores indican rangos de concentración (mg kg⁻¹, Sainz Rozas *et al.*, 2013).

Las deficiencias de micronutrientes no son comunes en la región pampeana. Se han reportado casos de deficiencias de Cl en trigo y de B en girasol en el oeste arenoso (Diaz Zorita *et al.*, 2004, Montoya *et al.*, 2003), de Zn en maíz y en arroz (Barbagelata *et al.*, 2012, Michiels y Ruffo, 2012, De Battista, 2014), y de Co, Mo y B en soja (Gutierrez Boem y Salvagioti, 2014).

Fuentes de micronutrientes

Dado que son nutrientes esenciales, todos los residuos vegetales tienen micronutrientes en su composición. También se pueden utilizar fertilizantes (previa autorización) que, en general, son sales o quelatos (Tabla 3). Los fertilizantes se pueden aplicar al suelo o al cultivo (aplicación foliar). La aplicación foliar suele ser la más eficiente, en particular si la dosis a aplicar es pequeña. Cuando las cantidades a aplicar son pequeñas, se hace muy difícil distribuir en forma homogénea productos sólidos. Por otro lado, si la deficiencia está asociada a alguna característica del suelo (e.g. pH), aplicarlo al suelo lo torna rápidamente no disponible en mayor proporción que cuando se aplica directamente a la planta. Otra forma de aplicación es con la semilla, que se utiliza para Co y Mo.

Tabla 3. Fertilizantes con micronutrientes (Pais y Benton Jones, 1997, Alloway, 2008, Bell y Dell, 2008).

	Nutriente	Fórmula	Concentración de nutriente %
B	Acido bórico	H_3BO_3	17.5
	Borato de sodio anhidro	$Na_2B_4O_7$	21
	Borato de sodio	$Na_2B_4O_7 \cdot 5H_2O$	15
	Borax	$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$	11
Cl	Cloruro de potasio	KCl	47
	Cloruro de sodio	NaCl	60
	Cloruro de amonio	NH_4Cl	66
	Cloruro de calcio	$CaCl_2$	64
	Cloruro de magnesio	$MgCl_2$	74
Cu	Sulfato de cobre	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	25
	Cloruro de cobre	$CuCl_2$	47
	Oxido cuproso	Cu_2O (poco soluble)	89
	Quelatos de cobre	$Na_2CuEDTA$ $NaCuHEDTA$	13 9
Fe	Sulfato ferroso	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	19
	Quelatos de Fe	$NaFeEDTA$	6
		$NaFeDTPA$	10
Mn	Oxido de Mn	MnO (insoluble)	77
	Sulfato de Mn	$MnSO_4 \cdot xH_2O$	23-32
	Cloruro de Mn	$MnCl_2$	44
	Quelato de Mn	$MnEDTA$	5-12
Mo	Molibdato de amonio	$(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$	54
	Molibdato de sodio	$Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$	40
	Oxido de Mo	MoO_3	66
Zn	Sulfato de Zn	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	22
	Oxidos de Zn	ZnO (poco soluble)	50-80
	Nitrato de Zn	$Zn(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$	23
	Quelatos de Zn	$Na_2ZnEDTA$ $NaZnHEDTA$	8-14 6-10

Bibliografía

- ALLOWAY BJ. 2008. Micronutrients and crop production: an introduction. En: B.J. ALLOWAY (Ed), Micronutrient deficiencies in global crop production, Springer, pp. 1-39.
- ARNON DI, PR STOUT. 1939. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. *Plant Physiology*, 14: 371-375.
- BARBAGELATA PA, RJM MELCHIORI, JM PAUTASSO. 2012. Respuesta del maíz a la fertilización con cinc en entre ríos. XXIII Congreso argentino de la ciencia del suelo, Mar del Plata.
- BELL RW, B DELL. 2008. Micronutrients for Sustainable Food, Feed, Fibre and Bioenergy Production, IFA, Paris, France, 195p.
- BROWN PH. 2006. Nickel. En: AV BARKER, DJ PILBEAM (Eds) Handbook of plant nutrition, CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 395-410.
- DE BATTISTA JJ. 2014. Arroz. En: HE ECHEVERRIA, FO.GARCIA (Eds), Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos, Editorial INTA, Buenos Aires, pp. 631-645.
- DIAZ ZORITA, M, DUARTE GA, BARRACO M. 2004. Effects of chloride fertilization on wheat productivity in the sandy pampas region, Argentina. *Agronomy Journal* 96: 839-844.
- GUPTA UC. 2006. Boron. En: AV BARKER, DJ PILBEAM (Eds) Handbook of plant nutrition, CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 241-278.
- GUTIERREZ BOEM, FH, F SALVAGIOTTI. 2014. Soja. En: HE ECHEVERRIA, FO GARCIA (Eds), Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos, Editorial INTA, Buenos Aires, pp. 479-508.
- HAMLIN RL. 2006. Molybdenum. En: AV BARKER, DJ PILBEAM (Eds) Handbook of plant nutrition, CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 375-394.
- HECKMANJR. 2006. Chlorine. En: AV BARKER, DJ PILBEAM (Eds) Handbook of plant nutrition, CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 279-292.
- IPNI. 2016. INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE. Planilla de cálculo de requerimientos nutricionales. Revisado el 23/06/2016.
- JOHNSON GV, PE FIXEN. 1991. Testing soils for sulfur, boron, molybdenum, and chlorine. En: RL WESTERMAN (Ed) Soil testing and plant analysis, 3rd ed., SSSA, Madison, WI, pp. 265-273.
- KABATA-PENDIAS, A. 2011. Trace elements in soils and plants, 4 ed., CRC Press, 534 p.
- KOPSELL DR, DA Kopsell. 2006. Copper. En: AV BARKER, DJ PILBEAM (eds.) Handbook of plant nutrition, CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 293-328.
- MARTENS DC, WL LINDSAY. 1991. Testing soils for copper, iron, manganese and zinc. En: RL WESTERMAN (Ed) Soil testing and plant analysis, 3rd ed., SSSA, Madison, WI, pp. 229-264.
- MICHIELS CL, ML RUFFO. 2012. El zinc limita el rendimiento del maíz en la region pampeana argentina. XXIII Congreso argentino de la ciencia del suelo, Mar del Plata.
- MITCHELL CC. 1999. Nutrient removal by Alabama crops. Ext. Pub. ANR-449. Alabama State Coop. Ext., Alabama A&M and Auburn Univ., Auburn.
- MONTOYA J, A BONO, M BARRACO, M DIAZ ZORITA. 2003. Boro, un nutriente que crea incertidumbre: experiencias de fertilización en la región pampeana. Boletín de divulgación técnica no. 78, EEA Anguil, Ediciones INTA, 30p.
- MURRELL TS. 2005. Average nutrient removal rates for crops in the Northcentral Region.
- PAIS I, J BENTON JONES. 1997. The handbook of trace elements. CRC Press, Boca Raton, FL, 223 p.

- SAINZ ROZAS H, M EYHERABIDE, HE ECHEVERRIA, P BARBIERI, H ANGELINI, GE LARREA, GN FERRARIS, M.BARRACO. 2013. ¿Cuál es el estado de la fertilidad de los suelos argentinos? En: FO García y AA Correndo (Eds), Simposio Fertilidad 2013: nutrición de cultivos para la intensificación productiva sustentable. 62-72 pp.
- STOREY JB. 2006. Zinc. En: AV BARKER, DJ PILBEAM (Eds) Handbook of plant nutrition, CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 411-435.
- USDA. 2016. United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, National Nutrient Database for Standard Reference, <https://ndb.nal.usda.gov/ndb/nutrients/index>. Revisado el 23/06/2016
- ZUBLENA JP 1991. Soil Facts: Nutrient removal by crops in North Carolina. Ext. Pub. AG-439-16. North Carolina State Coop. Ext., North Carolina State Univ., Raleigh.

MUESTREO DE SUELOS

Helena Rimski-Korsakov y Carina R. Álvarez

Durante la actividad productiva y profesional surgen situaciones donde se requiere determinar ciertas características edáficas. Por ejemplo, podemos requerir evaluar la fertilidad del suelo (e.g. nivel de materia orgánica, nivel de nutrientes) o detectar problemas de acidez, sodicidad y halomorfismo. Para ello no es posible analizar la totalidad del suelo en cuestión dada la magnitud que representa. Por lo tanto, se recurre a la realización de un muestreo del suelo. La muestra de suelo que se obtenga debe ser representativa de la unidad en estudio (lote o tablón) sobre la que se quiere conocer el dato. Una muestra es representativa cuando refleja de la manera más exacta y precisa posible las características de la población total (en nuestro caso del suelo total).

La muestra que se envía al laboratorio es mínima en relación al total del suelo, siendo aproximadamente de 1 kg de suelo. Si por ejemplo el dato requerido se refiere a un lote de 20 ha y a una profundidad de 20 cm, estaríamos hablando de un total de 48000000 kg de suelo. Por lo tanto, nuestra muestra representa $2.08 \cdot 10^{-8}$ partes del total del suelo. Esto pone de manifiesto lo riguroso que se debe ser para realizar un muestreo que sea representativo. Para lograr lo anterior deben cumplirse con una serie de pasos y requisitos. A lo largo del presente capítulo iremos recorriendo las diferentes cuestiones a tener en cuenta para realizar un muestreo correcto.

Objetivos del muestreo

Tanto el muestreo como el análisis del laboratorio tienen un costo. Por lo tanto, cuando se realiza un muestreo debe tenerse un objetivo concreto. No se planea un muestreo sin antes saber que vamos a hacer con el valor que nos devuelva el laboratorio. Por ejemplo, si lo que queremos determinar es si nuestro cultivo sufrirá un déficit nutricional, debemos contar con algún valor de referencia donde se relacione el nivel del nutriente en cuestión y el rendimiento alcanzado por el cultivo. De lo anterior surge que el muestreo debe realizarse siguiendo las condiciones que fueron utilizadas para determinar dicho valor de referencia. Por ejemplo, podemos estar interesados en conocer el nivel de nitratos de nuestro suelo para saber si nuestro cultivo está en deficiencia de N. Para ello podemos contar con un modelo donde se relaciona el nivel de nitratos en el suelo con el rendimiento del cultivo determinado (Figura 1). Si quisiéramos utilizar dichos valores de referencia debemos respetar el momento y la profundidad de muestreo utilizados para generar dicha información, por ejemplo a la siembra y 0-60 cm. Si muestrearnos de 0 a 40 cm y usáramos el modelo men-

cionado estaríamos subestimando el contenido de nitratos de nuestro suelo y es probable que llegáramos a la conclusión que hay déficit de nitrógeno cuando en realidad no es así.



Figura 1. Ejemplo hipotético de modelo que relaciona el rendimiento con el nivel de nitratos en el suelo medido a la siembra de 0 a 60 cm.

Una vez definido el objetivo del muestreo debemos contestar una serie de preguntas: dónde muestrear, cuándo muestrear, cómo muestrear y con qué muestrear.

Variabilidad de los suelos

Las diferentes características edáficas varían espacial (en sentido horizontal y vertical) y temporalmente. Esta variabilidad puede ser natural o generada por el hombre. La variabilidad natural es generada por cuestiones ambientales, por ejemplo climáticas o de relieve, que influyeron definiendo los diferentes tipos de suelos. Generalmente este tipo de variabilidad se da a grandes escalas. A través de un estudio previo al muestreo se puede conocer este tipo de variaciones, por lo que se pueden determinar áreas de muestreo homogéneas. Un ejemplo de lo anterior es la ocurrencia de diferentes ambientes edáficos por diferentes posiciones topográficas en un lote (bajo y loma) que determinan que las muestras sean analizadas en forma separada según la posición (Figura 2).

Por otro lado, existe una variabilidad introducida por el hombre, que se relaciona con los manejos previos realizados. Este tipo de variaciones en general aparecen a menor escala que las naturales. Un ejemplo de lo anterior son las prácticas como el abonado, donde las características edáficas variarán según la cantidad de abono recibido.

También pueden encontrarse sitios puntuales dentro de la zona de muestreo con características muy diferentes al resto del área. Estos sitios pueden ser determinados por aguadas, alambrados, arboledas de descanso animal, construcciones demolidas, etc. Si se las detecta, deben ser evitadas en la toma de muestras. Por ejemplo, en la Figura 2 se muestra la ubicación de una antigua arboleda que, de existir animales, es un área de descanso de los mismos. Esta área debe evitarse en el muestreo ya que puede elevar los niveles de nutrientes del suelo por existir una concentración de deyecciones en esta zona.

Debido a las variaciones mencionadas, si se sacaran conclusiones con una sola muestra se estaría en riesgo de cometer un error importante. Por ejemplo, si nuestra muestra única proviene de un área de mayor fertilidad que el resto de la unidad de estudio se estaría sobrevalorando el nivel de la variable medida de todo el lote. Por lo tanto, se recurre a la obtención un una muestra compuesta que es generada por una serie de submuestras. A continuación se explicará cómo obtener dichas submuestras y luego generar la muestra compuesta.

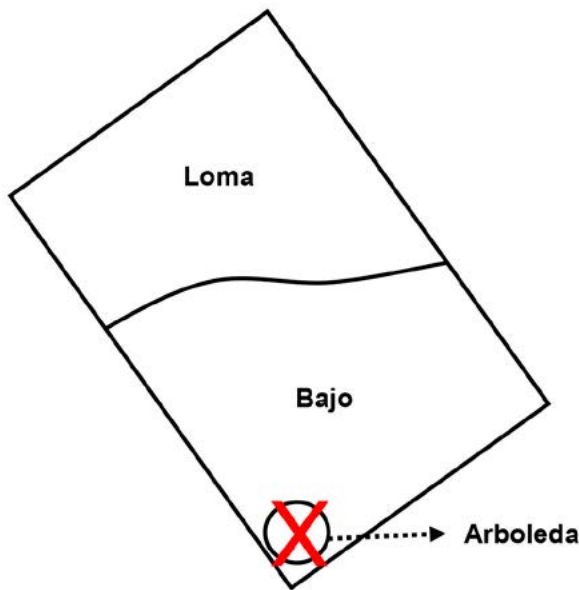


Figura 2. Ejemplo de zonas homogéneas en el lote (loma y bajo) que determinarán muestreos independientes. La zona de arboleda antigua no debe ser muestreada.

Cómo muestrear

Antes de decidir el diseño de muestreo debe realizarse un estudio del sitio para detectar características que definan áreas homogéneas de muestreo. Si en nuestra unidad de muestreo existen áreas que donde se aprecian diferencias significativas, debe enviarse al laboratorio una muestra por cada una de las zonas en cuestión. Por ejemplo, volviendo al ejemplo de la Figura 2, es presumible que los valores del cada una de las áreas (loma y bajo) diferirán sustancialmente entre sí. Por lo tanto, al laboratorio se enviará una muestra compuesta de la loma y otra del bajo.

Por otro lado, como mencionamos anteriormente, si sacáramos solo una muestra en cada zona correríamos el riesgo de sacar conclusiones erróneas al generalizar un valor a partir de una única medición. Por lo tanto, se trabaja con muestras compuestas. Es decir, al laboratorio se enviará una muestra que estará constituida por una serie de submuestras o piques. La intensidad de muestreo, es decir la cantidad de submuestras que se necesita sacar para generar una muestra representativa, es como mínimo 25, independientemente de la superficie del lote o área de medición.

Las submuestras deben ser tomadas siguiendo algún patrón que contemple la totalidad de la zona a muestrear. En la Figura 3 se muestran diferentes diseños de muestreo posibles.

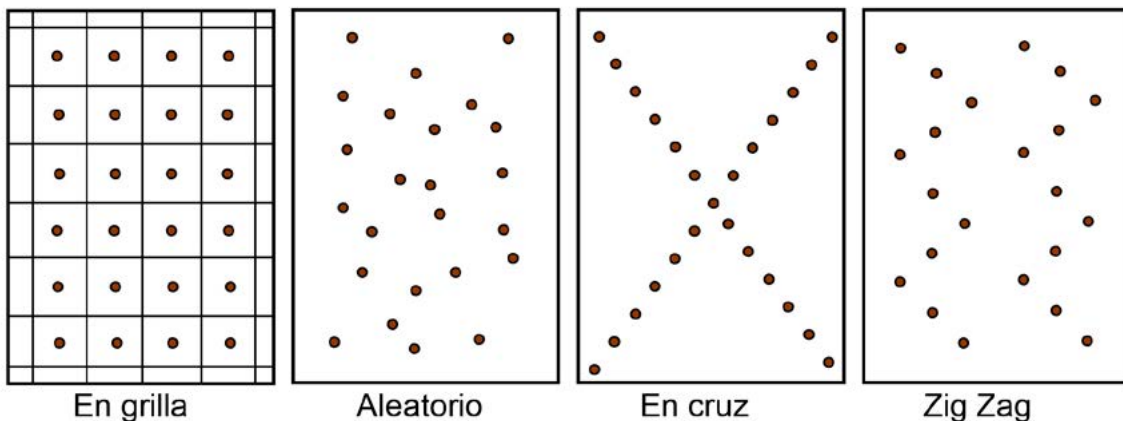


Figura 3. Diseños de muestreo. Cada punto indica donde se tomarían las submuestras que constituirán la muestra compuesta.

Las muestras de suelo pueden ser tomadas con barrenos o simplemente con una pala de corte. En ambos casos deben estar limpios, sin óxido y debidamente afilados. Los barrenos tienen la ventaja sobre las palas que toman la muestra sin necesidad de hacer previamente un pozo, tienen poco disturbio, facilita mantener la profundidad seleccionada y siempre se obtiene la misma cantidad de suelo de cada profundidad muestreada.

Para muestrear con el barreno debe ubicarse con el barreno en forma perpendicular a la superficie del suelo (Figura 4). Haciendo presión hacia abajo, se clava hasta la profundidad seleccionada. Si el suelo está muy duro puede recurrirse a golpear la sección superior del barreno con una masa con punta de goma. A continuación, se saca el barreno del suelo y se descarga la muestra en un balde o una bolsa, donde se irán recolectando todas las submuestras de esa profundidad. Hay que tener mucho cuidado de que el barreno entre con un ángulo de 90° en todas las posiciones. Si esto no se respeta y el barreno ingresa torcido, corremos el riesgo de sacar una muestra de una profundidad menor y llegar a un valor erróneo. Por ejemplo, la concentración de fósforo disminuye con la profundidad. Si el barreno entra en forma torcida, estaríamos sacando la muestra del suelo de los estratos más superficiales. Por lo tanto estaríamos sobrestimando el valor de fósforo no alcanzando la profundidad estandarizada.

Si el muestreo se realiza con pala, antes de sacar la muestra debe realizarse un pozo de la profundidad deseada (Figura 4). Después se saca una porción de una de las caras de aproximadamente 3 cm de espesor y de la profundidad seleccionada. Una vez sacada la palada se eliminan los bordes laterales y se retiene el centro de la muestra con la profundidad deseada.

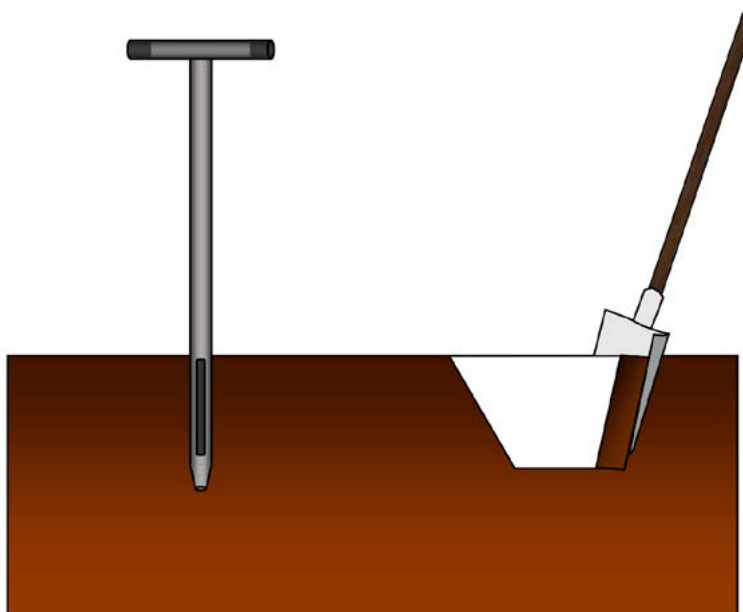


Figura 4. Barreno y pala en posición de muestreo.

Profundidad de muestreo

Como se dijo anteriormente el objetivo del muestreo definirá la profundidad del mismo. En general, los nutrientes móviles se muestrean a mayor profundidad que los poco móviles. Por ejemplo, la profundidad requerida para determinar el nivel de nitratos la mayoría de las veces es de 0 a 60 cm y para P es de 0 a 20 cm.

Los barrenos tienen diferentes profundidades de muestreo. Si la profundidad de muestreo requerida supera la del barreno, una vez sacada la muestra de la primera profundidad debe volver a enterrarse el barreno hasta la profundidad seleccionada. Por ejemplo, si se requiere una muestra de 0 a 60 cm para evaluar el nivel de nitratos del suelo y el barreno tiene una capacidad de 20 cm, se extraerá la primera muestra de 0 a 20 cm y luego se volverá a introducir el barreno para sacar los siguientes 20 cm que corresponderán a la profundidad de 20 a 40 cm. De la misma manera se procede para la profundidad de 40 a 60 cm. Al reingresar el barreno para acceder a profundidades mayores, debe tenerse la precaución de no generar desmoronamiento de las paredes laterales ya que contaminaríamos la muestra con suelo correspondiente a otra profundidad.

Cuando se está realizando un muestreo para determinar el nivel de nitratos en la región pampeana y se requiere conocer el valor hasta los 60 cm de profundidad puede extraerse la muestra hasta los 20 cm y extrapolar dicho valor hasta los 60. Una forma de realizarlo tiene como fundamento que en promedio para la región pampeana se considera que la concentración de nitratos disminuye el 50% cada 20 cm hasta los 60 cm de profundidad. Por lo tanto, puede muestrearse el suelo hasta los 20 cm y luego estimar la cantidad de nitratos hasta los 40 y/o 60 cm. Por ejemplo, si el nivel de nitratos de 0 a 20 cm es de 50 kg NO₃ el cálculo sería el siguiente:

$$\text{NO}_3 \text{ (kg NO}_3\text{/ha 0-20 cm)} = 50 \text{ kg NO}_3\text{/ha de 0-20 cm}$$

$$\text{NO}_3 \text{ (kg NO}_3\text{/ha 0-60 cm)} = 50 + (50 * 0.5) + (25 * 0.5) = 87.5 \text{ kg NO}_3\text{/ha de 0-60 cm}$$

Momento y periodicidad de muestreo

El momento de muestreo y su periodicidad están condicionados por el objetivo del mismo. A la vez, están definidos por la variabilidad de la propiedad edáfica en cuestión. Por ejemplo, los nitratos y sulfatos del suelo varían mucho en el tiempo y deben ser medidos todos los años y lo más cercano posible al momento de la siembra. A diferencia de lo anterior, el nivel de materia orgánica y de fósforo disponible de los suelos varía poco con el tiempo. Se requiere de una serie importante de años de determinado manejo para que existan diferencias en dichos valores. Por lo tanto, no es necesario medir dichas variables todos los años o en determinado momento del año, pudiéndose medir cada 2 a 4 años. Existen otras variables como la textura, el pH y la capacidad de intercambio catiónica (CIC) que son muy estables y su determinación puede realizarse una única vez para caracterizar el suelo en cuestión. Sin embargo, las dos últimas pueden variar si se realiza algún manejo nocivo, por ejemplo riego con agua de mala calidad. Por lo tanto, si existe algún riesgo, el muestreo debe realizarse rutinariamente cada 1 ó 2 años.

Todo muestreo debe realizarse con la anticipación tal que haya tiempo suficiente para enviar la muestra al laboratorio, esperar sus resultados, interpretarlos y tomar las medidas pertinentes (e.g. adquisición de materiales correctores, fertilizantes permitidos, etc.).

El contenido hídrico del suelo también puede afectar al momento del muestreo. De existir precipitaciones, deben esperarse por lo menos 48 horas antes de muestrear el suelo. El contenido hídrico óptimo para muestrear es de aproximadamente 25%.

Armado y conservación de la muestra

Una vez que tenemos en el recipiente de recolección todas las submuestras debemos reducir la cantidad de suelo hasta aproximadamente 1 kg. Para ello debemos homoge-

neizar las submuestras. Lo primero que debe hacerse es romper los terrones existentes de todas las submuestras y mezclarlas. Luego se procede al “cuarteo” de las muestras. Esto consiste en distribuir todo el suelo sobre una lona plástica limpia. Se mezcla el suelo depositado y se lo divide en 4 cuartos. De estos, se descartan 3 cuartos y con el restante se repite la operación hasta que la muestra alcance el peso requerido. Conviene que se guarde una parte del suelo que no fue enviado al laboratorio hasta obtener los resultados.

La muestra formada es una muestra compuesta ya que está formada por diferentes submuestras o piques. Esta muestra compuesta debe ser enviada al laboratorio en una bolsa de plástico limpia, debidamente identificada. Esto puede realizarse con marcador indeleble o puede ponerse una doble bolsa con un papel identificativo entre ellas. Nunca debe ponerse en contacto la muestra de suelo con el papel.

La muestra debe enviarse al laboratorio lo más rápido posible. Si el análisis requerido puede ser afectado por la actividad microbiana, como es el caso de los nitratos, hasta ese momento, debe mantenerse refrigerada o debe ser secada al aire. Para secarse al aire debe extenderse el suelo lo más fino posible en algún lugar donde no dé el sol.

Los errores más comunes que llevan a que la muestra no sea representativa fueron enumerados por Carretero *et al.* (2016). Dentro de ellos se encuentran: cantidad de submuestras insuficientes; no mantener la profundidad de muestreo entre las distintas submuestras; no homogeneizar bien la muestra; muestrear cerca de los alambrados o montes; no conservar adecuadamente las muestras hasta llegar al laboratorio; entre otros. A lo largo del presente capítulo fuimos recorriendo los aspectos necesarios para no cometer dichos errores y poder obtener una muestra representativa.

Análisis de tejidos vegetales con fines de diagnóstico

Existe una serie de métodos de diagnóstico que utilizan a la planta como indicadora de situaciones de estrés nutricionales. El más sencillo, pero a la vez menos preciso, es el diagnóstico visual. Esta forma de diagnóstico se basa en la detección de colores y deformaciones de las hojas características de deficiencias nutricionales. Por ejemplo, deficiencias de nitrógeno generan colores amarillentos en las hojas más viejas. Esta forma de diagnóstico requiere mucha experiencia y en general se recomienda que se compare los síntomas observados con aquellos mostrados por imágenes reportadas en literatura específica. Los síntomas observados pueden confundirse con otros estreses ambientales y una vez que aparecen suele ser tarde para corregir la deficiencia. Por todo lo anterior, este método solo debe ser usado como complemento de otros.

El método de diagnóstico más utilizado que realiza mediciones en la planta es el que mide la concentración de nutrientes en las hojas u otros órganos. El objetivo de realizar un análisis de tejidos vegetales es determinar si la concentración de nutrientes se encuentra en suficiencia o deficiencia. Los valores encontrados se comparan con tablas de referencia de donde surge si está o no en suficiencia. Este análisis puede mostrar déficits asintomáticos, posibilitando actuar sobre ellos. Cuando se detecta una concentración que se halla dentro del rango de deficiencia, no siempre implica que el nutriente en cuestión está en deficiencia en el suelo, ya que pueden existir otras limitantes que impiden que el nutriente sea absorbido. Es complementario al análisis de suelo.

El muestreo de tejidos vegetales tiene una serie de requisitos mayores a los de suelo. Esto se debe a que la variabilidad es mayor en este caso. Por ejemplo, la concentración de un nutriente en la planta varía durante el día. Por eso, cuando se plantea un muestreo debe

mirarse en detalle las especificaciones que se reportan en los datos que utilizaremos como referencia. Dentro de ellas pueden encontrarse momento del día a muestrear, momento fenológico y edad de la planta, tipo y posición del tejido a muestrear. Una vez definido lo anterior, hay que determinar la cantidad de muestras a tomar, especificada nuevamente en la técnica utilizada para los datos de referencia. Debe tenerse la precaución de no tomar como muestras órganos que presenten daños, ya sea por plagas o mecánicos. Una vez recolectadas las muestras, los tejidos deben guardarse en bolsas de papel, debidamente rotulados. A partir de allí, hay formas de determinación que requieren el envío a laboratorio, que nos devolverá los resultados de la concentración del nutriente expresados como porcentaje, mg/kg de materia seca vegetal o partes por millón (ppm), cuando las concentraciones son muy bajas. Estos valores se comparan con tablas de referencias para cada cultivo en particular, donde figuran los rangos de concentraciones para cada nutriente, en los que se encuentra como deficiente o no. Por otro lado, hay una forma diagnóstica que utiliza la concentración en el jugo celular pudiendo ser realizada directamente en el establecimiento. En estos casos, las hojas o pecíolos son triturados en un mortero, se deja reposar para que salga el jugo celular y luego, ya sea con cintas colorimétricas o con electrodos específicos se determina la concentración del nutriente. La misma está expresada generalmente en mg/L y se compara con valores de referencia.

Bibliografía

CARRETERO R, PA MARASAS, E SOUZA, A ROCHA. 2016. Conceptos de utilidad para lograr un correcto muestreo de suelos. Archivos Agronómicos IPNI 15: 1-11.

CAPÍTULO 12

CULTIVOS DE COBERTURA

Helena Rimski-Korsakov y Carina R. Álvarez

Los cultivos de cobertura son especies que no se siembran buscando obtener un producto cosechable, sino que se busca un beneficio ambiental. Dentro de estos beneficios se pueden poner como ejemplo el control de erosión o el ingreso de nitrógeno (N) al suelo por el uso de especies leguminosas. Se siembran entre dos cultivos de cosecha (Figura 1) o bien entre líneas de cultivos perennes (frutales, forestales, industriales). Los abonos verdes buscan objetivos similares pero, a diferencia de los cultivos de cobertura, son incorporados al suelo con alguna labranza. Los verdeos también pueden sembrarse en el período entre dos cultivos de cosecha, pero en este caso son destinados para el pastoreo animal.



Figura 1. Esquema temporal de situaciones con y sin cultivo de cobertura.

Dentro de los objetivos buscados al realizar cultivos de cobertura pueden mencionarse:

- **Controlar la erosión** es el objetivo más difundido de los cultivos de cobertura (Alberts y Neibling, 1994). Dicho control se logra al estar el suelo cubierto ante la ocurrencia de lluvias o vientos intensos. De esta manera, evitan la pérdida del horizonte superficial (nutrientes, materia orgánica), la disminución de la productividad y los efectos extraprediales como la sedimentación de los materiales erosionados en ríos o reservorios de agua.
- La biomasa (aérea y radical) aportada por los cultivos realizados puede generar **incrementos en el contenido de materia orgánica** del suelo (Wander y Traina, 1996). Dicho efecto no se logra con la realización de esta práctica en una sola campaña. O sea, para detectar diferencias significativas en estos niveles, el uso de cultivos de cobertura debe repetirse en el tiempo.
- Las **propiedades físicas** de los suelos pueden verse mejoradas por el incremento de la materia orgánica mencionado (Saluzzio y Benintende, 2004). Por otro lado, el sistema radical generado contribuye a mejorar la agregación del suelo.

- Cuando se usan especies leguminosas como cultivos de cobertura se logra un **ingreso de N al suelo por fijación biológica** del N atmosférico. Parte del manejo del N en producciones orgánicas, especialmente en los planteos extensivos donde el uso de abonos orgánicos se dificulta, se basa en esta práctica.
- Un beneficio ambiental que generan los cultivos de cobertura es la **disminución de las pérdidas por lixiviación de nitratos**. Los cultivos de cobertura absorben los nitratos existentes en el suelo y susceptibles a lixiviarse y posteriormente los liberan al descomponerse dejándolos disponibles para el cultivo siguiente (Ruffo y Parsons, 2004).
- Otro beneficio adicional en planteos orgánicos, no relacionado con la fertilidad del suelo, es el **control de malezas** por competencia o alelopatía. En relación a los insectos y patógenos hay casos de acción positiva y otros negativa.

Hasta ahora se mencionaron los efectos benéficos generados por el uso de cultivos de cobertura. Sin embargo, existen situaciones donde su uso genera reducciones en el rendimiento del cultivo siguiente al mismo (Hoffmann y Johnsson, 2000; Reddy, 2001). La competencia por nutrientes, especialmente por N, y por agua entre el cultivo de cobertura y el cultivo de cosecha son las principales razones que provocan la disminución del rendimiento (Thorup-Kristensen *et al.*, 2003). Por lo tanto, deben estudiarse las condiciones ambientales, tanto climáticas como edáficas, para minimizar dichos efectos negativos. Por ejemplo, debe prestarse atención al tiempo necesario que debe ocurrir entre la finalización del cultivo de cobertura y la siembra del cultivo siguiente para garantizar la recarga del perfil del suelo con agua y N.

Especies utilizadas como cultivo de cobertura

A la hora de seleccionar las especies para ser usadas como cultivos de cobertura deberán tenerse en cuenta:

- Las condiciones ambientales (clima, temperatura, suelo)
- El planteo productivo (anual o perenne)
- La estación de crecimiento
- El objetivo buscado (cobertura, fijación de N, bioperforación, etc.)
- Los costos de semillas y siembra

Las especies más utilizadas como cultivos de cobertura en zonas templadas pertenecen a las familias de las gramíneas y de las leguminosas. Las gramíneas presentan un rápido crecimiento y una mayor producción de biomasa. Por lo tanto, se aconseja su uso como cultivo de cobertura cuando se busca: controlar la erosión, absorber nutrientes para evitar su lixiviación, disminuir el plantel de malezas, incrementar el nivel de materia orgánica y mejorar la estabilidad estructural del suelo. Por otro lado, las leguminosas son la alternativa cuando el objetivo es la fijación de N atmosférico debido a la asociación raíz-rizobio. Estas especies tienen menores producciones de materia seca y mayores tasas de descomposición acorde con una menor relación C/N. La liberación de N puede ajustarse mejor a la demanda del cultivo siguiente por una relación C/N más baja comparada con las gramíneas. Una alternativa de interés es realizar cultivos de cobertura asociando una gramínea con una leguminosa. La combinación de ambas permite lograr los beneficios conjuntos de una rápida cobertura del suelo por la gramínea y la fijación biológica de N₂ por parte de la leguminosa. Por otro lado, el alto consumo del N por las gramíneas estimula la

fijación biológica de N de la leguminosa. Asimismo, puede haber un aprovechamiento de los recursos (agua y nutrientes) a distinta profundidad si se combinan sistemas radicales de características disímiles.

Las especies gramíneas poseen distinta estación de crecimiento y la elección dependerá del planteo de producción. Dentro de las otoño-invernales se destacan: centeno, trigo, cebada, avena, raigrás anual y triticale (Ruffo y Parsons, 2004; Tabla 1). El centeno se caracteriza por una alta tasa de crecimiento, producción de biomasa y raíces fibrosas, tiene buena tolerancia al frío y al estrés hídrico (Ruffo y Parsons, 2004). A su vez posee efecto alelopático. El raigrás corre el riesgo de convertirse en maleza. La avena es otra alternativa interesante como cultivo de cobertura por la disponibilidad de variedades adaptadas a las diferentes zonas de la Región Pampeana.

En el caso de las primavera-estivales se encuentran el maíz de guinea, sorgo, moha y mijo. En planteos de cultivos perennes (ej. montes frutales o yerbatales) entre líneas puede utilizarse especies como raigrás perenne, pasto elefante, festuca u otras especies anuales. Las leguminosas otoño-invernales que se pueden utilizar como cultivo de cobertura son las vicias (*Vicia sativa* y *villosa*) y los tréboles (Tabla 1). La *Vicia villosa* y el trébol encarnado acumulan la mayor parte del N entre dos a tres semanas previas a la floración (Ruffo y Parsons, 2004). Dentro de las especies de ciclo primavera-estival se encuentran el caupí, soja de cultivares de maduración tardía y crotalaria. Dentro de las plurianuales están la alfalfa y tréboles (frutilla, blanco).

Tabla 1. Especies utilizadas como cultivo de cobertura según su familia y ciclo de crecimiento.

Gramíneas

Crecimiento otoño-invernal

- Centeno (*Secale cereale*)
- Avena (*Avena sativa*)
- Cebada (*Hordeum vulgare*)
- Raigras anual (*Lolium multiflorum*)
- Triticale (*Triticum aestivum* x *Secale cereale*)
- Cebadilla (*Bromus unioloides*)
- Trigo (*Triticum aestivum*)

Crecimiento Primavera-estivales

- Maíz de guinea (*Sorghum technicum*)
- Sorgo (*Sorghum vulgare*)
- Moha (*Setaria italica*)
- Mijo (*Panicum Miliaceum*)

Leguminosas

Crecimiento otoño-invernal

- Vicia (*Vicia sativa*; *Vicia villosa*)
- Trebol rojo (*Trifolium pratense*)
- Trebol de Alejandría (*Trifolium alexandrinum*)
- Trébol encarnado (*Trifolium incarnatum*)
- Arveja (*Pisum sativum*)

Crecimiento Primavera-estivales

- Caupí (*Vigna unguiculata*)
- Soja (*Glycine max*)
- Crotalaria (*Crotalaria juncea*)

Otras

Crecimiento otoño-invernal

- Colza (*Brassica napus*, *Brassica campestris*)
- Nabo forrajero (*Raphanus sativus*)
- Mostaza (*Sinapis alba*)

En la Tabla 2 se presenta una recopilación de los valores medios, máximos y mínimos de producción de biomasa de distintos cultivos de cobertura de la Región Pampeana. Se contemplaron sólo situaciones que no recibieron fertilización ni abono. Cabe destacar que todas las especies detalladas son de crecimiento otoño-invernal. Esto se debe a que en la región de estudio la rotación típica no deja al suelo descubierto en verano ya que está conformada por la sucesión de cultivos de verano, y/o secuencias trigo/soja II, estando en este caso todo el año el suelo cubierto.

Tabla 2. Valores medios, máximos y mínimos de biomasa aérea acumulada por distintas especies en la Región Pampeana. Se indica el número de casos considerados. Las situaciones no recibieron fertilización o abono. Recopilado a partir de: Restovich *et al.*, 2006, Quiroga *et al.*, 2007, Restovich *et al.*, 2008, Ronconi *et al.*, 2008, Baigorria y Cazorla, 2009, Barraco *et al.*, 2009, De Batista y Arias, 2009, Frasier *et al.*, 2009 a y b, Quiroga *et al.*, 2009, Rimski Korsakov *et al.*, 2009, Scianca *et al.*, 2009, Vanzolini *et al.*, 2009, Capurro *et al.*, 2010, Vanzolini *et al.*, 2010.

Especie	Producción de biomasa aérea (kg MS/ha)			Casos
	Promedio	Mínimo	Máximo	
Avena	4544	889	8771	17
Cebada	2384	802	4954	7
Cebadilla	3980	3980	3980	1
Centeno	3970	1100	10505	26
Colza	6091	6091	6091	1
Nabo forrajero	5437	5437	5437	1
Raigrás	3227	700	6384	22
Trigo	7264	5516	8268	3
Triticale	4248	1144	6953	6
Vicia	2994	1231	6330	18
Avena +Vicia	4899	1703	8518	5
Centeno + Vicia	4369	4369	4369	1
Triticale + Vicia	4713	4713	4713	1

Formas de finalizar el ciclo de cultivo de cobertura

El ciclo del cultivo de cobertura debe ser finalizado con la suficiente antelación para reducir la competencia entre el mismo y el cultivo siguiente. En planteos de producción orgánica no pueden utilizarse herbicidas, por lo que solo puede recurrirse a prácticas mecánicas para cortar su ciclo. Si el sistema es manejado con labranzas puede ser incorporado al suelo antes de la siembra del cultivo de interés pero en este caso estaríamos hablando de un abono verde y tendría otras características.

En producciones orgánicas tanto manejadas con siembra directa como con labranza convencional puede recurrirse a distintas alternativas mecánicas. Una de ellas es realizar un corte horizontal (por ejemplo usando cuchillas en V) bajo el suelo desvinculando las raíces de la parte aérea del cultivo. Un ejemplo de maquinaria que permite esta operación es el equipo de labranza "multicorte". Inclusive, luego del mismo es recomendable pasar un rolo para aplastar el residuo sobre la superficie. El residuo manejado de esta manera tiene una baja tasa de descomposición. Ello favorece su permanencia sobre el suelo asegurando la cobertura del mismo.

Otra alternativa, es cortar el cultivo de cobertura con segadoras. En este caso la fragmentación del residuo puede acelerar la descomposición. Por último, otra opción es el uso de rolo sobre el cultivo en pie. Esta operación produce el aplastamiento y daños vasculares en la planta causando la muerte de la misma (Baldwin, 2009).

La efectividad de la operación, evaluada como el porcentaje de plantas muertas, varía según el método, el cultivo y el momento cuando se realiza la operación (Creamer y Baldwin, 2010). Creamer y Baldwin (2010) observaron una alta tasa de muerte cuando se realizaba un corte debajo del suelo, mientras que el corte con segadoras era efectivo para las leguminosas pero no para las gramíneas, y el rolo presentaba baja efectividad en general. El rebrote es menor cuando se alcanzó el período de floración en las gramíneas (Sullivan, 2003). En caso de tener dificultades con el rebrote se recomienda recurrir a la labranza.

Efectos de los cultivos de cobertura sobre el suelo

Contenido de materia orgánica

Como se mencionó al inicio del capítulo, uno de los objetivos de utilizar cultivos de cobertura en planteos agrícolas es el de incrementar el contenido de materia orgánica del suelo. Esto se logra mediante el aporte de sus residuos vegetales, tanto aéreos como radicales. Los cambios en el contenido total de materia orgánica requieren de un manejo sostenido de la práctica por un período prolongado en el tiempo. Cambios en las fracciones más lábiles de la materia orgánica se expresan en menor tiempo que el contenido total de la misma (Marriott y Wander, 2006). Esto se debe a la magnitud de los ingresos de C en los residuos vegetales en relación a la del C en la materia orgánica del suelo en los componentes materia orgánica total y lábil. Por ejemplo, para ver dichas magnitudes podemos utilizar el promedio de las biomásas detalladas en la Tabla 2 para comparar su aporte de carbono con el contenido de C de la materia orgánica del suelo. La biomasa producida promedio es de 4.5 t ha^{-1} , con un contenido aproximado del 40% de C, o sea 1.8 t C ha^{-1} . La mitad de dicho C se humificará e ingresará al suelo: 0.9 t C ha^{-1} . Por otro lado un suelo con por ejemplo, 3% de materia orgánica, en sus primeros 20 cm tiene $43 \text{ t de C ha}^{-1}$. O sea que el ingreso de C en un año solo representaría un 2% del contenido de materia orgánica total.

Se analizaron numerosas experiencias locales de cultivos de cobertura que no fueron fertilizados, abarcando diferentes tipos de ambientes, especies y manejos. Se aprecia que el contenido de carbono orgánico de los suelos es significativamente mayor cuando se incluyen cultivos de cobertura en las rotaciones agrícolas, en comparación con el barbecho desnudo o enmalezado (Figura 2). El incremento promedio fue de $0.88 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, con un mínimo y un máximo de 0.3 y $1.7 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, respectivamente.

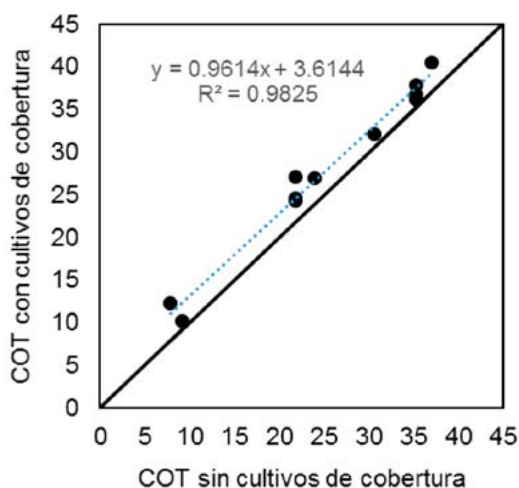


Figura 2. Relación entre el contenido de carbono orgánico total (COT) en planteos agrícolas con y sin cultivos de cobertura. Los cultivos de cobertura fueron utilizados por 3 años consecutivos o más, en la mayoría de los casos (Álvarez *et al.*, 2006, Sánchez *et al.*, 2007, Álvarez *et al.*, 2008, Cosentino *et al.*, 2008, Restovich *et al.*, 2010, Varela *et al.*, 2010).

En general, los incrementos en el contenido de materia orgánica se relacionan en forma directamente proporcional con la magnitud de la producción de biomasa del cultivo de cobertura. Por otro lado, la biomasa producida depende de la selección de especies utilizadas y de la duración de su ciclo. Scianca *et al.* (2009), en planteos productivos orgánicos, observaron que luego de la inclusión de diferentes cultivos de cobertura en la rotación por un ciclo se incrementaba el contenido de la materia orgánica joven del suelo. Dichos incrementos se relacionaron directamente con la cantidad de biomasa aportada por los distintos cultivos de cobertura (Figura 3). Varela *et al.* (2010) encontraron incrementos del 15% en el contenido de carbono orgánico total por la inclusión de diferentes cultivos de cobertura durante 4 años en una rotación de monocultivo de soja. Este incremento varió de acuerdo a la producción de biomasa de cada una de las especies utilizadas. El mayor incremento se logró con avena como cultivo de cobertura, seguido por el centeno. El raigrás no mostró diferencias con el testigo, atribuyéndose lo anterior a los menores residuos aportados por dicha especie en relación a las anteriores. Las especies gramíneas generan mayor biomasa que las leguminosas (Tabla 1). En tres experimentos realizados en la región pampeana, realizados sobre Argiudoles y Hapludoles Típicos, se determinó que las gramíneas (triticale y centeno) generaron mayores biomásas que una leguminosa (*Vicia sativa*) (Baigorria y Cazorla, 2009; Barraco *et al.*, 2009; Fargioni *et al.*, 2009). Las gramíneas produjeron desde un 26 a un 300% más de biomasa que la leguminosa. Por lo tanto, si el objetivo del uso de cultivos de cobertura es el de incrementar la materia orgánica del suelo, debería optarse por la inclusión de especies gramíneas.

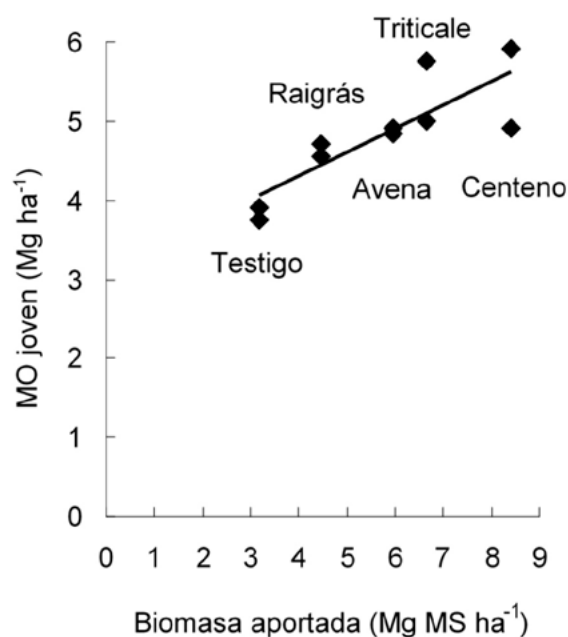


Figura 3. Relación entre el contenido de materia orgánica joven del suelo (0-5 cm) y la biomasa aportada por los cultivos de cobertura o la vegetación natural crecida durante barbecho sin cultivo de cobertura (Scianca *et al.*, 2009).

La duración del ciclo del cultivo de cobertura también influirá en la magnitud de la biomasa producida. Por lo tanto, cuanto más avanzado esté el ciclo en el momento de finalización del cultivo de cobertura, se espera que sea mayor la biomasa producida. Álvarez *et al.* (2006), utilizando triticale como antecesor del cultivo de soja, evaluaron tres momentos de finalización del ciclo: macollaje (90 días de barbecho), encañazón (40 días de barbecho) y madurez fisiológica (5 días de barbecho). Las producciones de biomasa fueron: 3180,

4900, 9735 kg MS año⁻¹, para cada uno de los momentos, respectivamente. Si bien no encontraron variaciones significativas en el nivel de materia orgánica total del suelo luego de 3 años de seguir esta práctica, sí detectaron una tendencia a mantener los niveles iniciales si existían cultivos de cobertura, especialmente al ser finalizados en madurez fisiológica. Por lo anterior, alargar el periodo de crecimiento de los cultivos de cobertura sería beneficioso para incrementar los niveles de materia orgánica edáfica. Sin embargo, no debe prolongarse el periodo tanto como para comprometer al cultivo siguiente, tema que será tratado más adelante.

Cambios en las propiedades físicas del suelo

Las propiedades físicas de los suelos pueden variar al incluir cultivos de cobertura en la secuencia de la rotación. Por ejemplo, si al realizar cultivos de cobertura se logra incrementar el nivel de materia orgánica, sumado a las raíces generadas, es esperable que disminuya la densidad aparente del suelo. Varela *et al.* (2010) encontraron una disminución en la densidad aparente del suelo de 10 a 20 cm por el uso de cultivos de cobertura en relación al monocultivo de soja (1.50 vs. 1.46 Mg m⁻³). También encontraron disminuciones en la resistencia a la penetración con el uso de avena y centeno, en relación al raigrás o barbecho desnudo. Esto fue atribuido a la mayor masa de residuos aportados y biomasa radical que incrementa el espacio poroso. La tasa de infiltración, presentó una tendencia a ser mayor ante la utilización de cultivos de cobertura. En otro trabajo, Álvarez *et al.* (2009), luego de cuatro años de utilización de cultivos de cobertura, encontraron incrementos de hasta 130% en la tasa de infiltración.

Por otro lado, Aruani *et al.* (2006) en un huerto orgánico de manzano del Alto Valle de Río Negro, encontraron que coberturas con especies perennes (alfalfa+festuca y trébol frutilla) luego de cuatro años incrementaban la estabilidad estructural de los agregados, en relación al testigo o al uso de una especie anual (vicia). Del mismo modo, Varela *et al.* (2010), en un Argiudol Típico, observaron que la avena como cultivo de cobertura disminuyó un 33% la inestabilidad estructural luego de un ciclo de crecimiento.

Los incrementos en la estabilidad estructural y la cobertura del suelo generada por los cultivos de cobertura disminuyen la susceptibilidad a la erosión. Ronconi *et al.* (2008), en una rotación raigrás-soja, determinaron que se reducía un 75% la pérdida de suelo hasta la siembra de la soja. Sin embargo, a cosecha de la soja dicho efecto desaparecía, no habiendo diferencias significativas entre la existencia de cultivos de cobertura y suelo desnudo. Esto lo atribuyeron a que a la cosecha de la soja, el rastrojo generado del raigrás en su mayoría se había descompuesto.

Efecto de los cultivos de cobertura sobre el cultivo de interés

Al realizar cultivos de cobertura se pueden lograr efectos tanto positivos como negativos sobre el cultivo siguiente. Los cultivos de cobertura pueden reducir la población de malezas y organismos patógenos, así como mejorar las propiedades físicas y/o químicas del suelo. Estas cuestiones pueden mejorar los rendimientos del cultivo siguiente, y/o disminuir los costos de producción al bajar la necesidad de control de las adversidades mencionadas. Sin embargo, estos beneficios no siempre se logran, pudiendo incluso generarse una competencia por recursos entre los cultivos de cobertura y los de cosecha. Esta competencia puede ser por agua y/o nutrientes. Existe un compromiso entre la producción de biomasa

del cultivo de cobertura y la recarga del perfil de agua y nutrientes para el cultivo de cosecha. Para minimizar la competencia, el momento en que se finaliza el ciclo de los cultivos de cobertura debe ser tal que permita una adecuada generación de biomasa, y a su vez que se recargue el suelo de agua y nutrientes para el cultivo posterior. En referencia al agua, el tiempo de recarga del perfil está relacionado con el régimen pluviométrico de la zona en cuestión. Las regiones húmedas requerirán menor tiempo de recarga que las semiáridas. En relación al contenido de nitratos, al ser los mismos consumidos por el cultivo de cobertura y todavía no liberados por su descomposición, dejan menor N disponible para el cultivo siguiente. Si el cultivo de cobertura es una leguminosa, la tasa de descomposición será mayor, por lo que el tiempo necesario para que libere el N absorbido también será menor.

Efecto de los cultivos de cobertura sobre la disponibilidad de agua

El consumo de agua por los cultivos de cobertura debe ser entendida en dos formas, una positiva y otra negativa. Por un lado, el efecto positivo estaría dado por que el cultivo de cobertura aprovecha agua para generar biomasa, que de otra forma podría perderse. Esto se debe a que las precipitaciones ocurridas durante el barbecho pueden superar a la capacidad de retención hídrica de los suelos. De no existir un cultivo que la aproveche, el agua no retenida puede perderse por percolación, por escorrentía o por evaporación, sin contribuir a la generación de biomasa. Por otro lado, el efecto negativo estaría dado por la competencia con el cultivo de interés. Las experiencias locales, realizadas en la Región Pampeana, muestran que los cultivos de cobertura reducen significativamente el agua disponible y el contenido de nitratos a la siembra del cultivo siguiente (soja o maíz). En la zona húmeda de la región pampeana se determinó en promedio 21 mm menos de agua con un cultivo de cobertura previo (Figura 4A) (Rimski Korsakov *et al.*, 2015). El rango de diferencias varió entre 71 mm más y 36 mm menos de agua ante la presencia de un cultivo de cobertura previo. En la Semiárida se encontraron en promedio 5.6 mm menos de agua. En este caso los valores extremos fueron de 101 mm más y 40 mm menos con un cultivo de cobertura previo (Figura 4B). En cambio, cuando el lapso entre el fin del cultivo de cobertura y la siembra del cultivo de interés fue mayor a 2 meses no se encontraron diferencias en el contenido de agua en ninguna de las zonas.

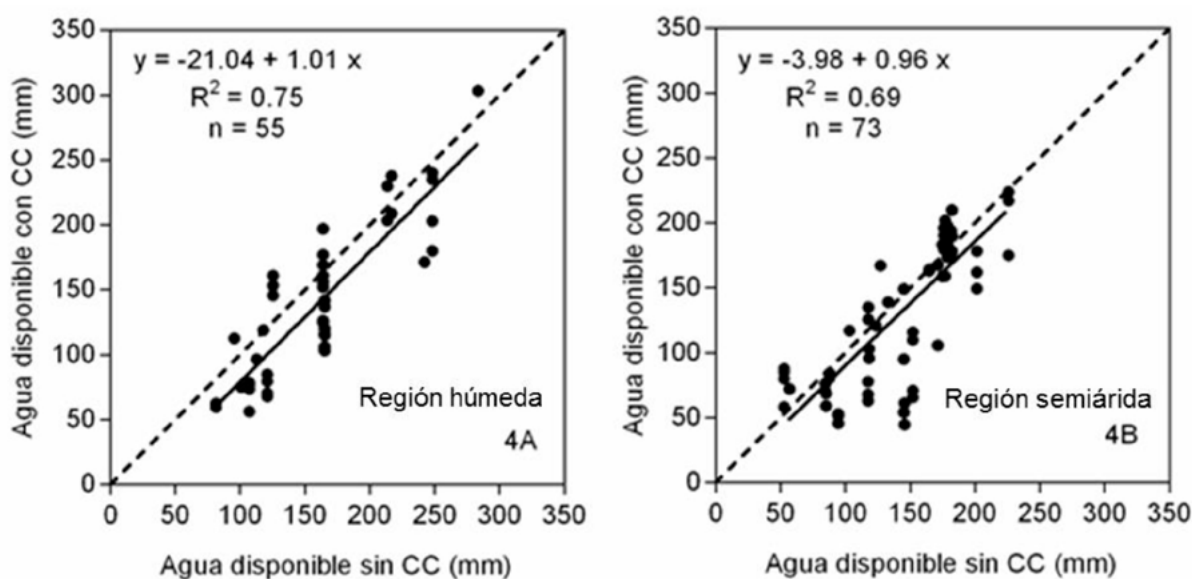


Figura 4. Relación entre el agua disponible a la siembra del cultivo principal (soja o maíz) con y sin cultivos de cobertura, para la región húmeda (A) y semiárida (B). La línea punteada indica la relación 1:1 (Adaptado de Rimski Korsakov *et al.*, 2015).

Efecto de los cultivos de cobertura sobre la disponibilidad de nitrógeno

Los cultivos de cobertura influyen sobre la nutrición nitrogenada en formas opuestas de acuerdo a la selección de las especies. Si se utilizan especies de la familia de las leguminosas el efecto puede ser positivo por el ingreso de N por fijación biológica. Este es uno de los pilares sobre los que se apoya el manejo de N en las producciones orgánicas extensivas. El cultivo de interés económico será más eficiente al usar el N fijado por una leguminosa cuanto más sincronizada esté su demanda con la liberación del nutriente retenido en el cultivo de cobertura. Dentro de los factores que condicionan la eficiencia del N fijado se encuentran el estado de madurez del cultivo de cobertura al ser finalizado, el tiempo entre la finalización del ciclo del cultivo de cobertura y la siembra del cultivo posterior y las condiciones ambientales como ser la temperatura y humedad durante ese período. Otro factor que condiciona la liberación del N es la relación C/N de la biomasa del cultivo de cobertura. Se han establecido relaciones C/N de 20-30 como el umbral entre la inmovilización de N y la liberación del mismo (Jensen *et al.*, 2005). La cantidad de N fijado es directamente proporcional a la producción de materia seca de la leguminosa (Álvarez y Steinbach, 2010). Los efectos benéficos de utilizar una especie leguminosa como cultivo de cobertura sobre un cultivo de maíz sin fertilizar, fueron demostrados por Baigorria y Cazorla (2009). El rendimiento del maíz fue mayor cuando se utilizó vicia en relación a otras especies o a barbecho desnudo (Figura 5). Utilizando la técnica de dilución con ^{15}N , Penón *et al.* (2010), en un Argiudol Típico del noreste de la Provincia de Buenos Aires, determinaron una fijación de 29 kg de N ha^{-1} utilizando trébol rojo o trébol rojo+avena como antecesores de soja.

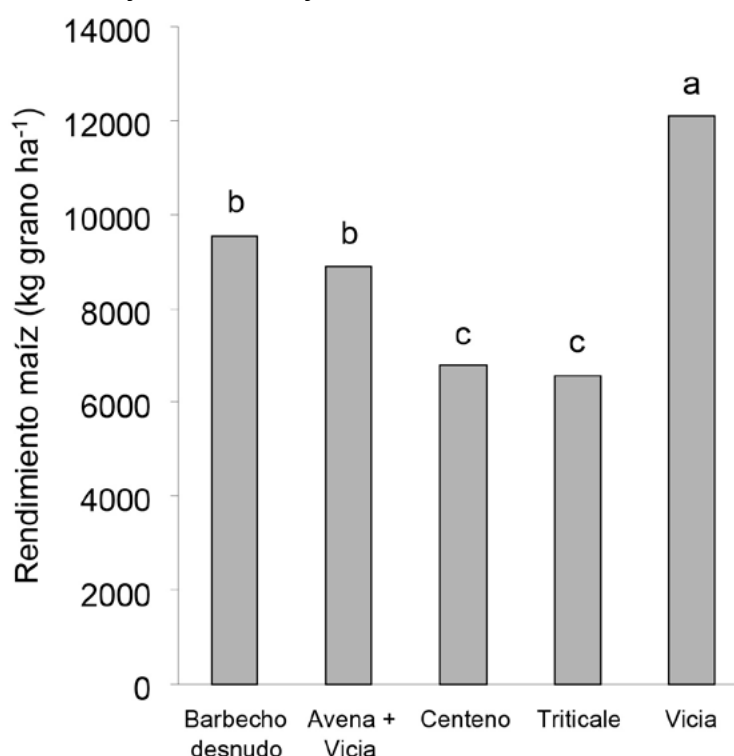


Figura 5. Rendimiento de maíz con diferentes cultivos de cobertura o barbecho desnudo previos (Baigorria y Cazorla, 2009).

También puede incrementarse el nivel de N para el cultivo siguiente como resultado de reducir las pérdidas de N por lixiviación durante el periodo de barbecho. Esto se aplica tanto a especies leguminosas como gramíneas. Desde el punto de vista ambiental, la absorción y retención de N por los cultivos de cobertura puede ser beneficiosa ya que reduce las pérdidas de nitratos por lixiviación.

En forma opuesta, si la especie seleccionada pertenece a la familia de las gramíneas, puede generarse un efecto negativo por competencia con el cultivo principal. Esto se debe a que, si no se respeta el tiempo necesario de barbecho, el N absorbido por el cultivo de cobertura puede no llegar a liberarse por descomposición en los momentos que el cultivo principal lo requiere. En las experiencias relevadas para la región pampeana se detectaron en promedio $52 \text{ kg N-NO}_3 \text{ ha}^{-1}$ menos al momento de la siembra del cultivo principal en situaciones no fertilizadas ante la presencia de un cultivo de cobertura.

Efecto de los cultivos de cobertura sobre el rendimiento del cultivo principal

Los efectos de los cultivos de cobertura mencionados a lo largo del capítulo pueden afectar el rendimiento de los cultivos principales, en forma ya sea positiva o negativa. Por ejemplo, se pueden esperar incrementos en los rendimientos cuando el cultivo de cobertura contribuyó a un mejor control de malezas o a mejoras en las propiedades físicas y químicas del suelo. Los efectos negativos están dados por la competencia por recursos ya mencionada. En este sentido se analizaron los datos disponibles de experimentos correspondientes a maíz y soja, cultivados en las zonas pampeanas húmeda y semiárida (Figura 6) (Rimski Korsakov *et al.*, 2015). Cabe destacar que se consideraron tanto experiencias orgánicas como tradicionales dada la escasez de datos de las primeras. En la zona húmeda, ni el rendimiento de la soja ($p= 0.55$; $n=82$) ni el del maíz ($p= 0.148$; $n= 54$) fueron significativamente afectados por el desarrollo de un CC previo (Figura 6). Esto muestra que los menores contenidos de agua encontrados en esta zona cuando se implantó un CC previo (Figura 4A) no afectaron el rendimiento; seguramente las lluvias de

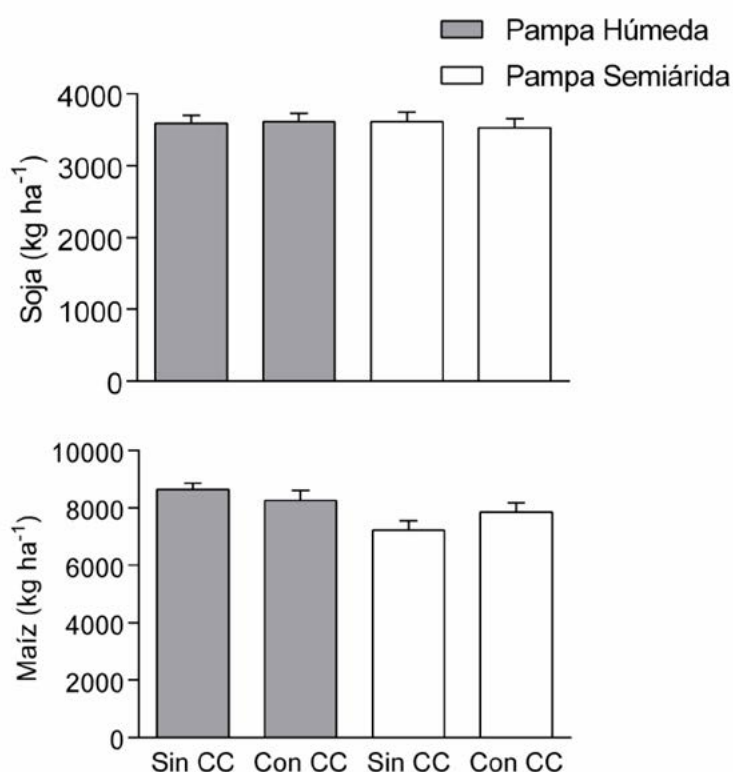


Figura 6. Rendimientos de soja y maíz, sin y con un cultivo de cobertura (Sin CC y Con CC, respectivamente) previo para las subregiones húmeda y semiárida de la Región Pampeana. Líneas: Error estándar.

primavera-verano lograron revertir dicha situación. En la zona semiárida, el rendimiento de la soja tampoco mostró diferencias entre suelos donde había un CC previo o el suelo estaba desnudo ($p=0.08$; $n=73$) (Figura 6). En forma opuesta, en esta zona el maíz rindió en promedio 620 kg ha^{-1} más cuando previamente había un CC ($p<0.01$; $n=45$). Probablemente esto se deba a una mejor eficiencia en la dinámica del agua, pues con el suelo cubierto con CC, disminuye la evaporación, entre otros efectos benéficos de este manejo.

Bibliografía

- ALBERTS E, WH NEIBLING. 1994. Influence of crop residues on water erosion. In: UNGER P. (ed.), *Managing Agricultural Residues*, Lewis Publisher, Texas, pp.19-39.
- ÁLVAREZ C, C SCIANCA. 2006. Cultivos de cobertura en Molisoles de la región pampeana. Aporte de carbono e influencia sobre propiedades edáficas. Día de Campo EEA INTA Villegas. Jornada Profesional Agrícola 2006.
- ÁLVAREZ C, C SCIANCA, M BARRACO, M DIAZ-ZORITA. 2008. Impacto de diferentes secuencias de cultivos en siembra directa sobre propiedades edáficas en Hapludoles de la pampa arenosa. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, San Luis. Actas en CD.
- ÁLVAREZ, R, HS STEINBACH. 2010. Ciclado de nitrógeno en agrosistemas. En: *Fertilidad de suelos. Caracterización y manejo en la Región Pampeana*. R Álvarez, G RUBIO, CR Álvarez, RS LAVADO (Eds). Editorial Facultad de Agronomía, Buenos Aires, pp. 231- 270.
- ARUANI MC, E SANCHEZ, P REEB. 2006. Cambios en las propiedades de un suelo franco bajo producción orgánica de manzano utilizando coberturas vegetales. *Ciencia del Suelo* 24: 131-137.
- BAIGORRIA T, C CAZORLA. 2009. Evaluación de especias como cultivo de cobertura en sistemas agrícolas puros en siembra directa. *Jornadas Nacionales Sistemas Productivos Sustentables: Fósforo, nitrógeno y cultivos de cobertura*, Bahía Blanca. Actas en CD.
- BALDWIN KR. 2009. Conservation tillage on organic farms. <http://www.cefs.ncsu.edu/resources/organicproductionguide/tillagefinaljan2009.doc>
- BARRACO M, C ÁLVAREZ, C SCIANCA. 2009. Aporte de nutrientes y rastrojo de diferentes especies utilizadas como cultivo de cobertura. *Jornadas Nacionales Sistemas Productivos Sustentables: Fósforo, nitrógeno y cultivos de cobertura*, Bahía Blanca. Actas en CD.
- CAPURRO J, J SURJACK, J ANDRIANI, MJ DICKIE, C GONZALEZ. 2010. Evaluación de distintas especies de cultivos de cobertura en secuencia soja-soja en el área sur de la provincia de Santa Fe. *Informaciones Agronómicas* 47: 13-15.
- COSENTINO DJ, AO COSTANTINI, JC GALARZA. 2008. Efectos del cultivo de cobertura y la fertilización sobre algunas propiedades de un argiudol pampeano y el rendimiento del cultivo de maíz. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, San Luis. Actas en CD.
- CREAMER NG, KR BALDWIN. 2010. Summer cover crops. <http://www.ces.ncsu.edu/depts/hort/hil/hil-37.html>. Ingreso 26/10/2010.
- DE BATISTA JJ, N ARIAS. 2009. Cultivos de cobertura: efecto de la duración del barbecho sobre el aporte de rastrojo y rendimiento de soja. *Cultivos de soja en el Centro Este de Entre Ríos-Resultados 2008-2009*. INTA EEA Concepción del Uruguay: 1-5.

- FARGIONI M, C VEGA, T BAIGORRIA, J PIETRANTONIO, C CAZORLA. 2009. Cultivos de cobertura y su efecto sobre la disponibilidad hídrica y nitrogenada a la siembra y el rendimiento de maíz. Jornadas Nacionales Sistemas Productivos Sustentables: Fósforo, nitrógeno y cultivos de cobertura, Bahía Blanca. Actas en CD.
- FRASIER I, R FERNANDEZ, A QUIROGA. 2009a. Respuesta de Vicia sativa a distintas tecnologías de cultivo. Jornadas Nacionales Sistemas Productivos Sustentables: Fósforo, nitrógeno y cultivos de cobertura, Bahía Blanca. Actas en CD.
- FRASIER I, R FERNANDEZ, A QUIROGA. 2009b. Valoración de especies invernales como cultivos de cobertura. Jornadas Nacionales Sistemas Productivos Sustentables: Fósforo, nitrógeno y cultivos de cobertura, Bahía Blanca. Actas en CD.
- HOFFMANN M, H JOHNSON. 2000. Nitrogen leaching from agricultural land in Sweden. Model calculated effects of measures to reduce leaching loads. *Ambio* 29:67-73.
- JENSEN LS, T SALO, F PALMASON, TA BRELAND, TM HENRIKSEN, B STENBERG, A PEDERSEN, C LUNDSTRÖM, M ESALA. 2005. Influence of biochemical quality on C and N mineralization from a broad variety of plant materials in soil. *Plant and Soil* 273: 307-326.
- MARRIOTT EE, MM WANDER. 2006. Total and Labile Soil Organic Matter in Organic and Conventional Farming Systems. *Soil Science Society of America* 70: 950-959.
- PENON E, C DI CIOCCO, M GALVAN, O CORREA, M DIAZ- ZORITA, J HEREDIA. 2010. Fijación de nitrógeno, producción de biomasa y control de malezas en la secuencia: cultivos de cobertura-soja inoculada con *Bradyrhizobium japonicum* y *Azotobacter chroococcum*. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Santa Fe. Actas en CD.
- QUIROGA A, P CARFAGNO, MJ EIZA, R MICHELENA. 2007. Inclusión de cultivos de cobertura bajo agricultura de secano en la Región Semiárida Pampeana. Jornadas de Cultivos de Cobertura General Villegas y General Pico. Actas en CD.
- QUIROGA A, R FERNANDEZ, I FRASIER, C SCIANCA. 2009. Cultivos de cobertura. Análisis de su inclusión en distintos sistemas de producción. Jornadas Nacionales Sistemas Productivos Sustentables: Fósforo, nitrógeno y cultivos de cobertura, Bahía Blanca. Actas en CD.
- REDDY KN. 2001. Effects of Cereal and Legume Cover Crop Residues on Weeds, Yield, and Net Return in Soybean (*Glycine max*). *Weed Technology* 15: 660-668.
- RESTOVICH S, M TORTI, D COLOMBINI, E ANDRIULO. 2010. Evolución de algunas propiedades físicas y químicas edáficas durante la implantación de cultivos de cobertura en la secuencia soja-maíz. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario. Actas En CD.
- RESTOVICH S, A ANDRIULO, C AMENDOLA. 2008. Definición del momento de secado de diferentes cultivos de cobertura en la secuencia soja-maíz. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, San Luis. Actas en CD.
- RESTOVICH S, A ANDRIULO, C SASAL, A IRIZAR, F RIMATORI, ML DARDER, L HANNUCH. 2006. Absorción de agua y de nitrógeno edáficos en diferentes cultivos de cobertura. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta. Actas en CD.
- RIMSKI-KORSAKOV H, MS ZUBILLAGA, MR LANDRISINI, I PINO, S ETCHEGARAY, N BALDASSINI, RS LAVADO. 2009. Cultivos de cobertura: ¿Son siempre eficientes para disminuir el riesgo de lixiviación de nitratos? Jornadas Nacionales Sistemas Productivos Sustentables: Fósforo, nitrógeno y cultivos de cobertura, Bahía Blanca. Actas en CD.

- RIMSKI-KORSAKOV H, CR ÁLVAREZ, RS LAVADO. 2015. Cover crops in the agricultural systems of the Argentine Pampas. *Soil and Water Conservation Society* 70: 134-140.
- RONCONI AP, PS SILVESTRE, MF SALUZZIO, J DE BATTISTA. 2008. Efectos del cultivo de cobertura con distinta duración de barbecho químico. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, San Luis, Argentina. Actas en CD.
- RUFFO ML, AT PARSONS. 2004. Cultivos de Cobertura en Sistemas Agrícolas. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, N° 21.
- RUFO ML. 2003. Factibilidad de inclusión de cultivos de cobertura en Argentina. XI Congreso de AAPRESID: 171-176.
- SAINJU UM, BP SINGH, WF WHITEHEAD. 2002. Long-term effects of tillage, cover crops, and nitrogen fertilization on organic carbon and nitrogen concentrations in sandy loam soils in Georgia, USA. *Soil and Tillage Research* 63:167-179.
- SALUZZIO MF, MC BENINTENDE. 2004. Uso agrícola sostenible en suelos vertisoles. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta-Jujuy. Actas en CD.
- SANCHEZ EE, A GIAYETTO, L CICHON, D FERNANDEZ, MC ARUANI, M CURETTI. 2007. Cover crops influence soil properties and tree performance in an organic apple (*Malus domestica* Borkh) orchard in northern Patagonia. *Plant and Soil* 292: 193-203.
- SCIANCA C, M BARRACO, C ÁLVAREZ. 2009. Estrategias de manejo de centeno utilizado como cultivo de cobertura en un Argiudol típico del NO Bonaerense. *Memoria Técnica*, 2008-9. EEA INTA Villegas, 25-28.
- SULLIVAN P. 2003. Overview of cover crops and green manures. <http://www.attra.org/attra-pub/PDF/covercrop.pdf>. Ingreso 26/10/2010.
- THORUP-KRISTENSEN K, J MAGID, LS JENSEN. 2003. Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. *Advances in Agronomy*, Vol 79. ACADEMIC PRESS INC, San Diego. pp. 227-302.
- VANZOLI JI, J GALANTINI, R AGAMEONNI, O REINOSO. 2009. Momento de control de cultivos de cobertura de Vicia villosa rot y su efecto sobre la producción de biomasa. *Jornadas Nacionales Sistemas Productivos Sustentables: Fósforo, nitrógeno y cultivos de cobertura*, Bahía Blanca. Actas en CD.
- VANZOLI JI, J GALANTINI, R AGAMEONNI, JM MARTINEZ, O REINOSO. 2010. Efecto del momento de secado de un cultivo de cobertura de Vicia villosa rot sobre su acumulación de biomasa y su contenido de N. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Santa Fe. Actas en CD.
- VARELA MF, PL FERNANDEZ, C ÁLVAREZ, C SCIANCA, G RUBIO, MA TABOADA. 2010. Propiedades físicas que varían por la incorporación de cultivos de cobertura en Haludoles franco arenosos. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Santa Fe. Actas en CD.
- WANDER MM, SJ TRAINA. 1996. Organic fractions from organically and conventionally managed soils: I. Carbon and nitrogen distribution. *Soil Science Society of America Journal* 60: 1081-1087.

CAPÍTULO 13

ABONOS ORGÁNICOS

Carina R. Álvarez y Helena Rimski-Korsakov

En el contexto de este libro, utilizaremos la denominación de abonos orgánicos para aquellos productos orgánicos desde el punto de vista químico, de origen vegetal o animal, que son adicionados al suelo para mejorar su calidad física y su fertilidad. Su utilización en producciones orgánicas debe enmarcarse en las normas establecidas en la resolución SAGyP 423/92.

Dicha resolución expresa que una de las estrategias para mantener o incrementar la fertilidad y la actividad biológica del suelo, es “la incorporación al terreno de abonos orgánicos, obtenidos de residuos provenientes de establecimientos propios o ajenos, cuya producción se guíe por las normas del presente Reglamento. En el caso de ser necesario, se podrán utilizar los fertilizantes orgánicos enumerados en el Anexo A, previo control de su origen y composición”. En la Tabla 1 se detallan los productos orgánicos correspondiente al Anexo A.

Tabla 1. Productos orgánicos mencionados en el Anexo A de la resolución SAGyP 423/92 según origen.

Origen vegetal	Origen animal
<ul style="list-style-type: none">• Algas y productos derivados• Aserrín• Cortezas vegetales y residuos de madera• Compost de residuos vegetales, provenientes del cultivo de hongos, de lombriz, de desechos domésticos orgánicos (vegetales)• Paja• Turba	<ul style="list-style-type: none">• Estiércol de granja y gallinaza, líquido u orinas, compostados• Harina de hueso y harina de sangre• Productos animales transformados procedentes de mataderos y de la industria de pescado

Abonos orgánicos no procesados

Los abonos orgánicos no procesados que pueden ser aplicados al suelo en forma directa, según la legislación, son los de origen vegetal. Los de origen animal (heces, orina) no pueden aplicarse sin el previo compostado ya que pueden poseer o portar patógenos.

En la Tabla 2 se presentan numerosos materiales de origen vegetal y animal que pueden ser utilizados como abono, o bien que pueden ser utilizados para la elaboración de abonos procesados como compost en planteos de producción orgánica. Conocer dichos valores es importante para tener una idea de la cantidad de nutrientes que se está adicionando directamente o que se está utilizando como fuente del compost.

Tabla 2. Composición de distintos residuos orgánicos de origen vegetal y animal. Los nutrientes están expresados en base seca (Alcántara, 1993, Parr y Colacicco, 1987 ambos en Pedreño *et al.*, 1995, Picado y Añasco, 2005, Álvarez *et al.*, 2016).

Residuo	MS (%)	N (%)	P (%)	K (%)	Mg (%)	S (%)
Estiércol bovino y porcino	16.8-32	0.3-3.5	0.02-2.2	0.3-3	0.24	0.03-0.04
Estiércol oveja	35-36	1.4-3.81	0.22-1.63	0.99-1.25	0.18	0.06-0.9
Estiércol gallina	28	0.3-5	0.24-3	0.75-3.2	2.7	
Estiércol de caballo	26	0.3-2.31	0.17-1.1	0.25-1.66	0.1	0.04
Harina de sangre	<10%	12-14				
Harina de carne y hueso	<10%	>6	>6.6			
Huesos en polvo		2-3	8.6-12.9			
Trigo		0.49	0.11	1.06		
Arroz		0.58	0.1	1.38		
Maíz		0.27-0.87	0.31	1.31		
Girasol		0.7-1.6				
Soja		0.5-2.1				
Algodón		0.88	0.15	1.45		
Lechuga		3.7				
Cebolla		2.6				
Tomate		2.1	0.3	0.2		
Gramíneas verdes y poda		0.9-2.2	0.4			
Gramíneas + leguminosas verdes		1.6-2.3	0.3-0.38			
Grano		1.9-2.7	0.58			
Viruta		0.09				

Compost

El compostaje es un proceso donde bacterias, hongos y actinomicetes degradan, en un ambiente aeróbico, los materiales orgánicos. Durante el mismo se produce liberación de CO₂ y una reducción de la masa del material. Este proceso permite la disminución y/o eliminación de patógenos, elimina olores y estabiliza el material. El compostaje involucra distintas etapas relacionadas con cambios en la temperatura (mesófila-termófila-enfriamiento-maduración). Los factores que condicionan o gobiernan el proceso de compostaje son: la temperatura, humedad, pH, oxígeno, la relación C/N del material original, tamaño de partícula y calidad del sustrato. La relación ideal C/N de la mezcla al inicio del proceso es de 30:1.

Hay distintos sistemas de producción de compost de complejidad variable que va desde composteros caseros, pilas, hasta reactores de compostaje. Durante el proceso de compostaje pueden ocurrir pérdidas de nutrientes. Esto tiene consecuencias ambientales negativas y, a su vez, disminuye la cantidad de nutriente que luego es aplicado al cultivo, en relación al contenido de los materiales originales. Álvarez *et al.* (2016) a partir de una recopilación de trabajos internacionales reporta pérdidas promedio de C del 64% (40-84%), de N del 49% (12-88%), de P del 35% (0-67%) y de K del 43% (7-86%). La principal vía de pérdida de nitrógeno durante el compostaje es la volatilización, mientras que para fósforo y potasio es la lixiviación. La cobertura de la pila, la compactación de la misma y otras prácticas permiten disminuir estas pérdidas.

En la Tabla 3 se presenta la composición de varios compost de diversos materiales originales (Álvarez *et al.*, 2016).

Tabla 3. Composición de compost de diversos materiales originales (Álvarez *et al.* 2016).

	pH	Ce (dSm ⁻¹)	C (%)	N (%)	C/N	P (%)	N-NH ₄ (ppm)	N-NO ₃ (ppm)
Residuos vegetales	4.1-8.3	0.15-2.4	10-30	0.64-1.5	10-30	0.15	40	9300
Algas	6.2-6.7	<10	22-36	2.1-2.8	11-13			
Estiércoles sólo o con residuos vegetales	6.5-7.6	1.2-12	14-25	0.85-2.2				
Cama de ave o stud	5.8-7.2	2.5-5.4	19-26	1.2-2.9	8-13	0.85-1.3	24-157	900-18500
Eviscerado pescado con viruta	6.4-6.8	1.9-4.5	43-48	2.4-2.7	16-18	1.6-1.7	570-3100	

La composición del compost varía según el material original. Los composts de origen vegetal poseen menor contenido de N y P. A su vez, el de cama de ave suele tener mayor contenido de P. Es importante destacar que los compost poseen parte de los nutrientes en forma inmediatamente disponible y otra fracción debe ser mineralizada para liberar los mismos. Por ejemplo, la mayor parte del N esta en forma orgánica pero hay una fracción mineral como nitrato y amonio.

Las dosis de compost más frecuentemente utilizadas están alrededor de las 10 t MS/ha (5 a 30 t/ha). Supongamos que se aplican 10 t de compost de cama de ave/ha, utilizando las concentraciones medias estaríamos adicionando:

$$\text{N orgánico (kg/ha)} = 10000 \text{ kg de compost/ha} \times 2.5 \text{ kg de N orgánico/100 kg de compost} = 250 \text{ kg N orgánico/ha}$$

$$\text{N-NH}_4 \text{ (kg/ha)} = 10000 \text{ kg de compost/ha} \times 90.5 \text{ kg de N-NH}_4 / 1000000 \text{ kg de compost} = 0.905 \text{ kg N-NH}_4 / \text{ha}$$

$$\text{N-NO}_3 \text{ (kg/ha)} = 10000 \text{ kg de compost/ha} \times 9700 \text{ kg N-NO}_3 / 1000000 \text{ kg de compost} = 97 \text{ kg N-NO}_3 / \text{ha}$$

Como puede apreciarse, si bien las concentraciones de N son bajas comparativamente con los fertilizantes sintéticos, las dosis utilizadas son mucho mayores. Por lo tanto, la aplicación de compost en las dosis habituales significa un aporte muy significativo de N, tanto en forma mineral como orgánica. De ello se desprende que es fundamental asegurar que la mayor parte del mismo sea retenido en el sistema, ya sea por el cultivo de interés

como por cultivos sucesivos de cosecha o de cobertura, o en la materia orgánica para minimizar las pérdidas por lixiviación. La adición de P es aún más alta que la del N si se compara con el requerimiento de los cultivos.

La adición de compost produce generalmente una mejora de las propiedades físicas (infiltración, estabilidad estructural, densidad aparente), un incremento del pH del suelo y un aumento de la conductividad eléctrica (Álvarez *et al.*, 2016). Esto último es un factor a tener en cuenta ya que puede generar complicaciones en la germinación o sobre el cultivo. Por otro lado, produce un aumento en el rendimiento, fundamentalmente debido al aporte de nutrientes. Numerosos ensayos realizados en Argentina muestran incrementos del rendimiento que van desde el 2 al 570%, siendo el promedio 48% (Álvarez *et al.*, 2016). Los experimentos involucran cultivos de lechuga, frambuesa, algodón, puerro, maíz y sorgo para silo, brocoli, acelga y cebolla. El compost se puede utilizar aplicándolo en los tablones de siembra o plantación hortícola, en la producción de plantines, en parques y jardines.

Lombricompuesto

El lombricompuesto es el producto orgánico obtenido por la acción de los microorganismos y las lombrices. En una primera etapa los materiales son procesados por los microorganismos (compost) y luego se introducen lombrices para, finalmente, obtener el lombricompuesto. La especie de lombriz más utilizada es la californiana. La composición del lombricompuesto es variable dependiendo de los materiales originales utilizados y de la especie de lombriz. El lombricompuesto produce mejoras en la calidad física del suelo y resulta en un aporte de nutrientes y de reguladores de crecimiento. Se puede utilizar en las mismas situaciones expuestas para el compost. En la tabla 4 se presentan las composiciones de diferentes lombricompuestos.

Tabla 4. Rango de composición de diversos lombricompuestos de distintos materiales originales que surge de una recopilación nacional (Álvarez *et al.*, 2016).

Material original	pH	Ce (dSm ⁻¹)	C (%)	N (%)	C/N	P (%)	N-NH4 (ppm)	N-NO3 (ppm)
Estiércol	6.8-7.8	0.42-16	19	1.2-1.6	12	0.52		
Estiércol y residuos vegetales	6.1-7.2	2.1-2.7	8.7-11	0.84-1.1	7.9	0.24-0.34		326
Residuos fruti -hortícolas	8	0.4	7.8	0.46	17			16800
No definido	6.9-8.4	2.9-8	17	1.3-1.5	20	0.97		

Otros procesos para la obtención de abonos

El biol es un abono líquido producto de la fermentación anaeróbica de residuos vegetales y/o animales. Para su realización se utilizan fermentadores donde se mezclan los residuos orgánicos (estiércol, hojas, frutos), con estimulantes de la fermentación (productos con azúcares fáciles de fermentar), minerales naturales y agua. Se aplica diluyendo el líquido en agua a razón de 2 al 4% pudiéndose aplicar cada 15 días al cultivo y al suelo. Considerando la concentración de nutrientes que posee el biol y la dilución con que se aplica, se puede concluir que su acción benéfica no se debe al aporte de nutrientes sino a que aporta reguladores de crecimiento u otras sustancias que poseen acción sobre el crecimiento o la protección vegetal.

El bocashi es un sistema de preparación de abono orgánico de origen japonés basado en un proceso de fermentación que se realiza en pocos días (10 a 25 días). Su preparación requiere estiércol de ave o cama de pollo, cáscara de arroz, tierra, carbón, sémola, melaza, cal, roca fosfórica, levadura o tierra de bosque o bocashi de origen previo y agua. Una limitante de este abono es que algunos de los elementos no están disponibles en los establecimientos. Su composición puede variar entre 1-4% de N, 1-4% de P y 1-4% de K. Su dosificación es similar a la del compost, siendo similares las concentraciones de los nutrientes de ambos abonos.

Bibliografía

- ÁLVAREZ R, HS STEINBACH, CR ÁLVAREZ. 2016. Manejo de la fertilidad en producción orgánica. En: Fertilidad de Suelos y Fertilización en la Región Pampeana.
- PEDREÑO N, M HERRERO, G LUCAS, M BENEYTO. 1995. Residuos orgánicos y agricultura. Universidad de Alicante. Pág. 155.
- PICADO J, A AÑASCO. 2005. Preparación y Uso de abonos orgánicos sólidos y líquidos. Corporación educativa para el desarrollo costarricense (Ed.). Pág. 66.

PRODUCTOS BIOLÓGICOS

María Marta Caffaro

Los microorganismos se comenzaron a describir hacia fines del año 1600, cuando se construyeron los primeros microscopios, pero sólo se estudiaban los microorganismos responsables de enfermedades. En el siglo XVI se observó la presencia de nódulos en las plantas leguminosas, pero en sintonía con los microorganismos responsables de enfermedades en animales y humanos se creía que eran tumores de las plantas. Esta teoría fue rechazada a mediados del siglo XIX, cuando Nägelli describió por primera vez a los hongos micorrízicos (Covacevich y Vargas Gil, 2014). Posteriormente, Hellriegel y Wilfarth demostraron que el mayor crecimiento en leguminosas se debía a la presencia de los nódulos en la raíz, realizándose posteriormente el primer aislamiento de la bacteria responsable de la fijación biológica de nitrógeno (Peticari *et al.*, 2007). Los estudios sobre diversidad microbiana en el suelo se comenzaron a realizar recién en la década de 1960.

Los microorganismos del suelo son responsables, junto a las lombrices, del ciclo de los nutrientes, debido a que cumplen numerosas funciones:

- La descomposición de la materia orgánica del suelo y de los residuos animales o vegetales, liberando los nutrientes.
- La transformación de las diferentes formas de fósforo del suelo, convirtiéndolos en formas disponibles que las utilizan para formar sus estructuras internas y también son aprovechadas por las plantas (*Pseudomonas* y *Aspergillus*).
- La asociación simbiótica con las raíces, que aumenta la adquisición de agua y nutrientes del suelo (micorrizas) o de la atmósfera (rizobios).
- La fijación no simbiótica de N_2 de la atmósfera y liberación de compuestos que estimulan el crecimiento radical (*Azotobacter* y *Azospirillum*).
- La producción de sustancias biocontroladoras que suprimen el crecimiento de otros microorganismos patógenos (*Bacillus*).
- La agregación del suelo por medio de la secreción de sustancias hidrófobas, que le confiere mayor estabilidad (micorrizas).

Las funciones específicas de los microorganismos se dan por diferentes vías, desde la síntesis de moléculas orgánicas simples (ácidos en *Pseudomonas* para solubilizar P) hasta enzimas específicas (fitasas en *Aspergillus*). En algunos casos, las asociaciones entre las plantas y los microorganismos de suelo son inespecíficas, como es en el caso de las micorrizas, mientras que en el caso de las bacterias fijadoras de nitrógeno, son altamente específicas, ya que una especie de microorganismo se asocia solamente con una o dos especies de planta. La diferencia en la especificidad se debe a la liberación de sustancias

que se secretan en la rizósfera que deben ser reconocidas por las raíces de las plantas para que se pueda iniciar el ingreso de estos microorganismos al interior de las células de la raíz (Spaink, 2000).

La práctica de utilización de microorganismos como complemento a la fertilización se ha difundido en las últimas décadas. En la actualidad, hay en el mercado una extensa variedad de productos biológicos para mejorar el crecimiento y posterior rendimiento de las plantas. Se los denomina inoculantes, fertilizantes biológicos o PGPM (Plant Growth Promoting Microorganism, microorganismos promotores del crecimiento de plantas). Al tratarse de organismos vivos se debe tener especial cuidado a la hora de manipularlos y aplicarlos para obtener el efecto deseado. Otra ventaja con respecto a los fertilizantes es que los productores, teniendo los recaudos necesarios, pueden cultivar a los microorganismos en sus predios o fincas.

La promoción del crecimiento de las plantas por los microorganismos se produce por dos mecanismos, directos e indirectos. En los mecanismos directos de interacción planta-microbio debe haber un reconocimiento entre ambas especies para que el intercambio sea satisfactorio y, además, debe ocurrir una interacción raíz-microorganismo. Las plantas proveen compuestos carbonados a los microorganismos y estos les proveen nitrógeno en el caso de las bacterias fijadoras de nitrógeno o fósforo en el caso de las micorrizas. Las micorrizas además, le proveen a las raíces protección contra el ataque de patógenos de manera indirecta además de aumentar el volumen de suelo explorado, por lo que aumenta también el agua y nitrógeno que las plantas pueden absorber.

Los microorganismos que interactúan en forma indirecta con las plantas no ingresan al interior de las células radicales. Son un grupo heterogéneo de bacterias y hongos que cumplen diferentes funciones en el suelo, beneficiando de manera indirecta el crecimiento de las plantas ya sea porque intervienen en el ciclado de nutrientes, liberan hacia la rizósfera compuestos que poseen actividad antifúngica (Dey *et al.*, 2004; Kumar y Narula 1999) o reguladores de crecimiento que estimulan el crecimiento del sistema radical de las plantas (Russo *et al.*, 2005). También hay un grupo de bacterias que favorecen la colonización de las micorrizas (Poole *et al.*, 2001).

Microorganismos que interactúan de forma directa con las plantas

Los microorganismos que interactúan en forma directa con las plantas son las bacterias del Género *Rhizobium*, que se asocian específicamente con las raíces de las leguminosas y fijan el nitrógeno atmosférico, y los hongos micorríticos del género *Glomus* y *Gigaspora* que intervienen en la adquisición de fósforo, entre otras funciones.

Bacterias simbióticas fijadoras de N atmosférico

Las especies que tienen la capacidad de establecer asociaciones simbióticas con bacterias fijadoras de N_2 , son las que mayor aporte de N al suelo hacen (aproximadamente el 65% del N total fijado vuelve al suelo con los residuos de cosecha, McNeill y Unkovich, 2007).

La nitrogenasa es la enzima responsable de fijar el N atmosférico por los microorganismos. Es una enzima extremadamente sensible a la presencia de O_2 . Incluso concentraciones muy bajas son suficientes para inactivar definitivamente a esta enzima. Para proteger a la nitrogenasa de este proceso de inactivación, los microorganismos han desarrollado diferentes estrategias:

1. Controlar la difusión de O_2 a través de barreras mecánicas y enzimáticamente por medio de la leghemoglobina.
2. Liberar hacia el medio extracelular enzimas que secuestran especies tóxicas de O_2 y también H_2O_2 .

Sólo las bacterias que se asocian con las raíces de las leguminosas realizan un aporte significativo de nitrógeno en el suelo, pudiendo a llegar hasta los $600 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, con un promedio de $200 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en el caso de la alfalfa (Racca y González, 2007), mientras que en la soja el aporte promedio es de 120 kg N ha^{-1} (Salvagiotti *et al.*, 2008). El aporte de los microorganismos no simbiotes, es menor a los $20 \text{ kgN ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en promedio (Lucy *et al.*, 2004). En la Figura 1 observamos el aporte de N de dos cultivos (las barras indican los valores promedio) y de los microorganismos no simbiotes.

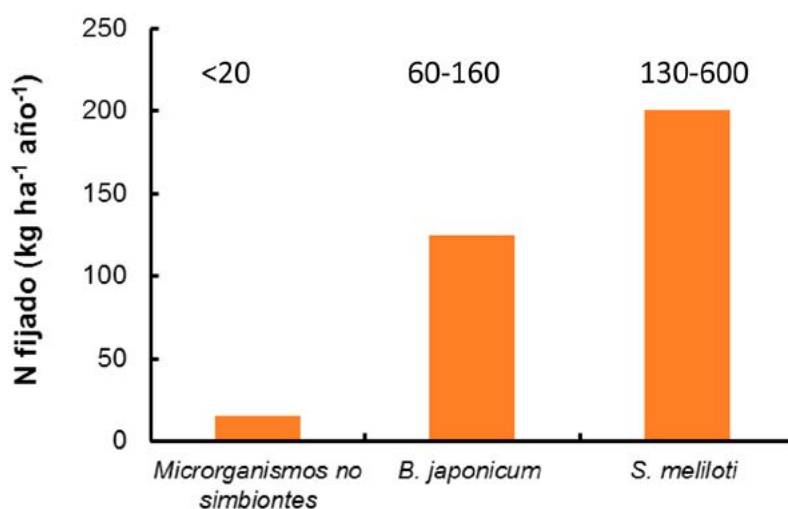


Figura 1. Aporte de nitrógeno por fijación en diferentes cultivos y por los microorganismos no simbiotes. Sobre las barras se indica el rango de fijación de N en $\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. (Adaptado de Álvarez *et al.*, 2015).

Para que la colonización sea efectiva, previamente debe suceder un evento de reconocimiento raíz-bacteria (Figura 2). El proceso de reconocimiento comienza con la liberación hacia la rizósfera de compuestos flavonoides que son reconocidos por las bacterias. Como respuesta, las bacterias sintetizan otro compuesto, denominado factores de nodulación (NOD). Una vez liberados estos compuestos y reconocidos, ocurre una transformación de la estructura de la raíz para favorecer el ingreso de las bacterias. Esta transformación comprende la desestabilización de la pared celular de la raíz para favorecer el ingreso de las bacterias, y la formación de una estructura denominada “gancho de infección” para aumentar la superficie de contacto con las bacterias. Una vez que las bacterias ingresaron por el gancho de infección migran hacia las células corticales y comienzan a transformarse en bacteroides. Los bacteroides son bacterias que perdieron su pared celular y modifican su metabolismo sintetizando la nitrogenasa funcional, además de perder la capacidad de sobrevivir fuera del nódulo.

Una vez que los nódulos son funcionales, comienza el intercambio: las plantas ceden compuestos carbonados sencillos hacia las bacterias y estas le transfieren N en forma de NO_3^- . Para que la nodulación sea efectiva, los niveles de NO_3^- del suelo deben ser menores a 50 kg ha^{-1} . Concentraciones mayores disminuyen en 50% la efectividad de la nodulación, debido al gran costo energético que le representa para la planta mantener la funcionalidad de los nódulos (Figura 3, Herridge *et al.*, 2001).

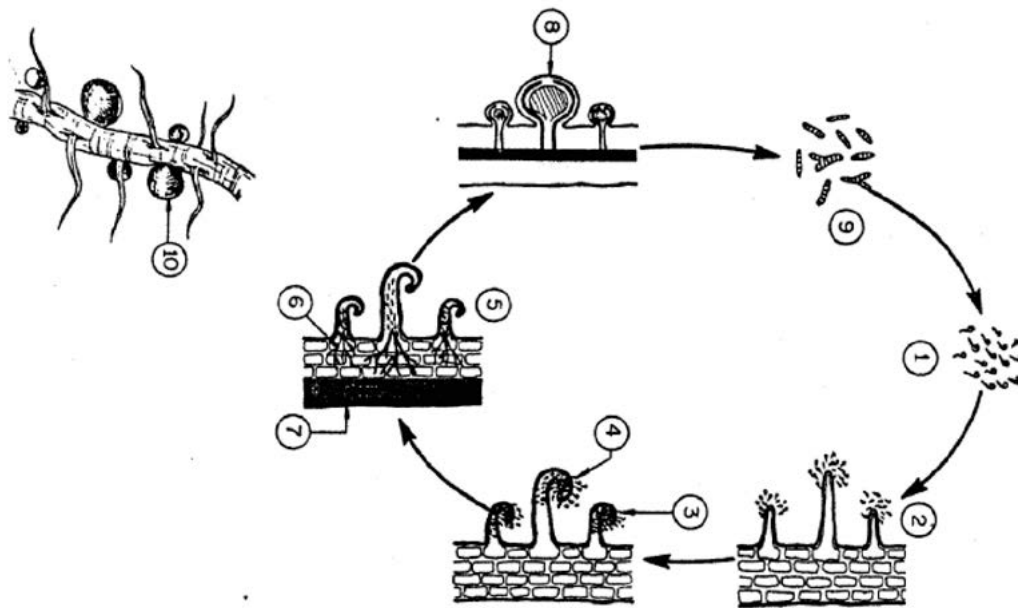


Figura 2. Dinámica de formación de un nódulo en la raíz en una leguminosa causado por *Rhizobium*. 1) *Rhizobium* libre; 2) *Rhizobium* atraído por el pelo radical; 3) Inicio de la infección por *Rhizobium* en el pelo radical; 4) Formación del “gancho” (pelos radicales, infectados por *Rhizobium*); 5 y 6) El cordón de infección de *Rhizobium* invade la matriz de células corticales de la leguminosa en la raíz; 7) *Rhizobium* se reproduce en células de la raíz y pierde su pared celular; 8) Se da la hipertrofia radical y aparece el nódulo; 9) *Rhizobium* sin pared (Bacteroide) en las células corticales fija nitrógeno; 10) El nódulo con leghemoglobina producida por las raíces fija N (Adaptado de FAO, 1995).

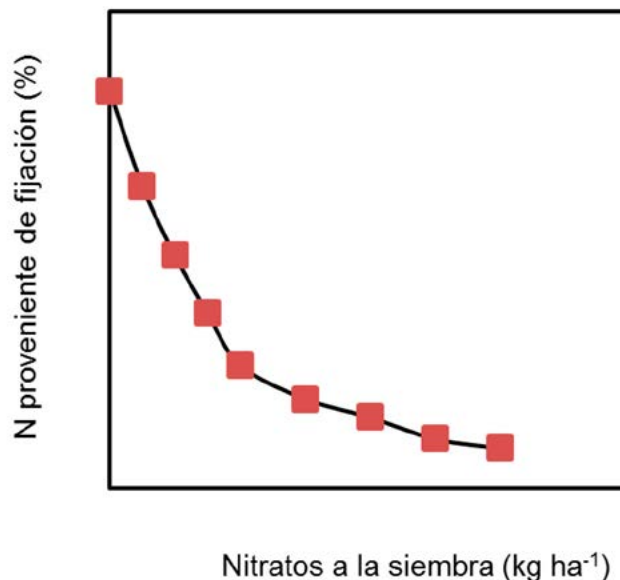


Figura 3. Efecto del nivel de nitrógeno en el suelo sobre la cantidad de N de la planta proveniente de la fijación biológica (adaptado de Herridge *et al.*, 2001).

Si los niveles de NO_3^- del suelo son elevados o si los nódulos no fijan la cantidad de nitrógeno que la planta huésped requiere, cesa la transferencia de compuestos carbonados hacia el bacteroide y el mismo deja de ser funcional. Además, cuando el cultivo entra en senescencia, finaliza la transferencia de compuestos carbonados hacia el nódulo, y la transferencia de nitrógeno hacia la planta. Las bacterias que no forman parte del bacteroide son liberadas al espacio extracelular.

La asociación rizobio/planta es altamente específica. En la Tabla 1 se detalla para cada leguminosa la/las especies de rizobacteria con las cuales la inoculación es efectiva. Es de vital importancia tener en cuenta la especificidad a la hora de inocular.

Tabla 1. Ejemplos de asociación leguminosa-bacteria.

Leguminosa	Bacteria
Glycine max (soja)	Bradyrhizobium japonicum y Sinorhizobium fredii
Pisum sativum (arveja)	Rhizobium leguminosarum bv. Viciae
Phaseolus vulgaris (poroto)	Rhizobium leguminosarum bv. phaseoli,+ R. etli y R. tropici
Trifolium spp. (trébol)	Rhizobium leguminosarum bv. trifolii
Medicago sativa (alfalfa)	Sinorhizobium meliloti
Medicago truncatula	Sinorhizobium meliloti
Vicia sativa	Rhizobium fabae

El cultivo de soja se inició en nuestro país en la década del '70 y en ese momento tanto la semilla como el inoculante provenían de Estados Unidos. Hasta ese momento, no había en los suelos de nuestro país especies de bacterias fijadoras que se asociaran con la soja, pero con las sucesivas campañas de siembra e inoculación, se establecieron en los suelos cepas de rizobios, que poseen la misma capacidad de colonizar las raíces. En la Figura 4 a se presenta la relación entre el rendimiento de cultivo de soja no inoculados –testigos- vs. inoculados a partir de la recopilación de 191 ensayos conducidos durante los años 2003-2007. Para evaluar el efecto de la inoculación se trazó la regresión lineal entre ambas variables y la pendiente representa el efecto de la inoculación. En los tratamientos inoculados, el rendimiento fue un 6% mayor respecto del testigo. Este efecto en el rendimiento se debe a que la inoculación se hace sobre la semilla, mientras que la población naturalizada debe llegar hacia la rizósfera, disminuyendo la efectividad de la nodulación.

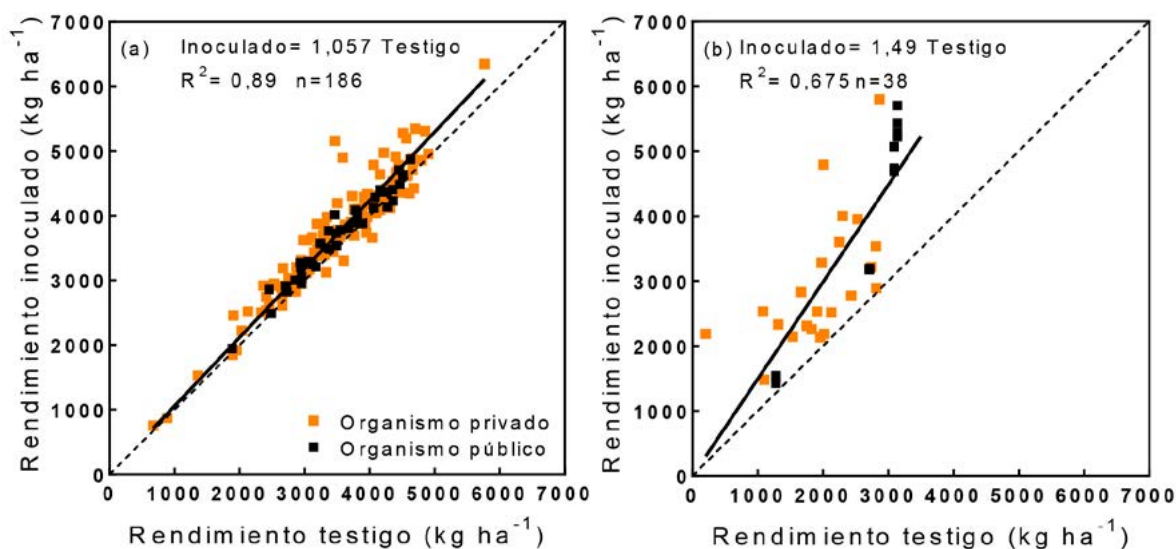


Figura 4. Efecto de la inoculación sobre el rendimiento en ensayos realizados en lotes a) con historia de cultivo de soja (Gutiérrez-Boem, 2008) y b) sin historia de cultivo de soja. Los datos fueron obtenidos a partir de informes técnicos realizados por organismos públicos y empresas dedicadas a la comercialización de inoculantes. La línea punteada representa la recta 1:1 y la línea sólida la regresión lineal entre las variables. Se testeó que la pendiente de la regresión fuera distinta de 1. Fuente de los datos: Arias 2008; Díaz Zorita *et al.*, 2003; 2004; 2005; Zamora-Massigou, 2002.

La soja cubre sus requerimientos de N a través de la fijación simbiótica del nitrógeno atmosférico y de la absorción del nitrógeno inorgánico del suelo. Si bien durante las primeras etapas del ciclo de cultivo el N proveniente del suelo es la principal vía de abastecimiento, poco tiempo después el nitrógeno fijado se convierte en la mayor fuente de provisión al sistema. Si bien la fijación alcanzaría a cubrir un 50 a 60% de la demanda total (Salvagiotti *et al.*, 2008), resulta todavía insuficiente para cubrir la exportación de N a través de los granos cosechados.

Con la expansión de la frontera agropecuaria en los últimos años en Argentina, se sembró el cultivo de soja en suelos sin población naturalizada de rizobios. En ensayos de inoculación realizados en estas condiciones se registraron aumentos del 50% con respecto a los testigos (Figura 4b).

Micorrizas

A diferencia de lo que ocurre con los rizobios, la asociación planta-microorganismo es poco específica. Esta asociación se da entre las raíces de plantas y hongos del género *Acaulospora*, *Entrophospora*, *Gigaspora*, *Glomus*, *Sclerocystis* y *Scutellospora*. También existe la asociación entre las raíces de especies forestales y hongos del género *Suillus*, *Cortinarius*, *Rhizopogon*, *Cenococcuym*, *Thelefora*, *Pisolithu*, pero en este caso, las hifas no penetran el interior de la célula radical. Sólo las plantas de las familias *Brassicaceae* (colza) y *Cyperaceae* no tienen la capacidad de establecer asociaciones con las micorrizas (Wang y Qiu, 2006).

La asociación entre plantas y hongos micorrízicos tienen diferentes beneficios: aumento del volumen de suelo explorado, produciendo una mayor adquisición de nutrientes y agua. El aumento en la superficie explorada es de gran importancia para los nutrientes poco móviles en la solución del suelo como el fósforo (Marschner, 2008). Además las micorrizas intervienen en la formación de macroagregados en el suelo, por la liberación de un compuesto llamado glomalina, altamente hidrofílico, promoviendo la estabilización de las partículas de microagregados (Douds y Johnson, 2007).

Para que ocurra la colonización por parte de las micorrizas, se debe producir una identificación entre la raíz y el hongo en regiones próximas a la zona de actividad radical. La raíz sintetiza compuestos que son reconocidos por las esporas, induciendo el crecimiento del micelio. Luego entran en contacto el micelio con la raíz y se forma una estructura llamada apresorio, que inducen cambios morfológicos en los tejidos de la micorriza y también en la pared celular de la raíz. Posteriormente se produce la integración fisiológica de ambos simbioses, y por último se produce una alteración de las actividades enzimáticas, que se coordinan para integrar sus procesos metabólicos (Barea *et al.*, 2005; Douds y Johnson 2007). Al igual que lo observado en la interacción rizobio-leguminosa, la efectividad en la colonización por parte de las micorrizas depende de los niveles de fósforo del suelo (Smith y Read, 1997).

En la actualidad no se encuentra en el mercado un inoculante basado en micorrizas. Para ser considerado un inoculante, es necesario poder asegurar que el producto cuente con un mínimo de microorganismos (en el caso de las bacterias es de 10^9 bacterias cm^{-3}). Como hasta el momento no es posible realizar cultivos de micorrizas en ausencia de un hospedador, resulta prácticamente imposible obtener un número estable de esporas de micorrizas que aseguren una eficaz colonización. Como la asociación micorriza-planta no es específica, si el productor no está seguro acerca de la calidad del suelo en su establecimiento, se recomienda tomar una pequeña cantidad de suelo de una zona virgen o poco explotada y colocarlo en el lote de producción como un inóculo natural.

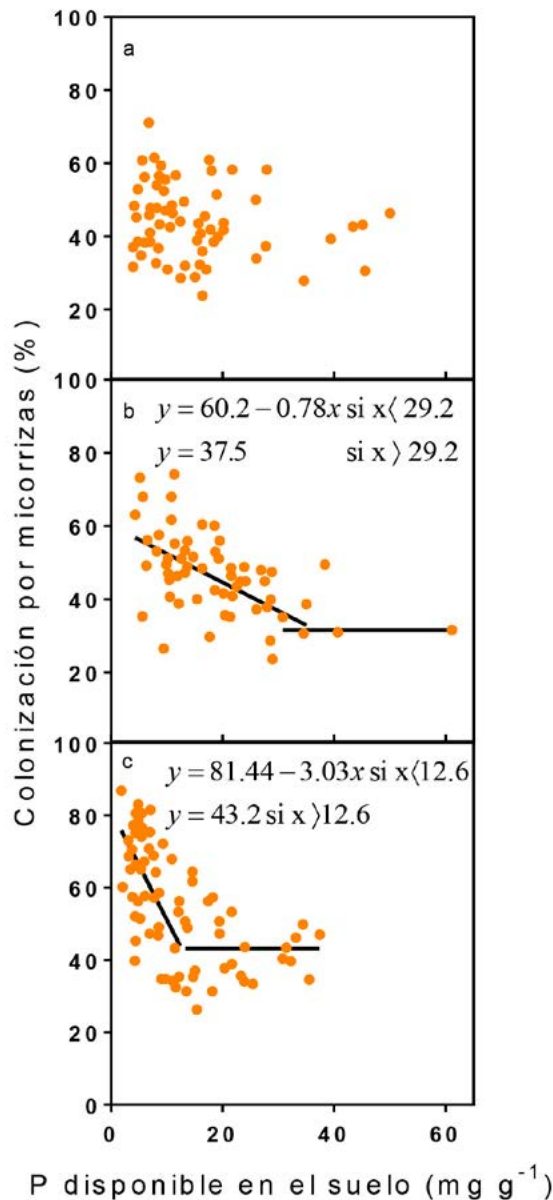


Figura 5. Porcentaje de colonización por hongos micorrízicos arbusculares (HMA) de acuerdo al P disponible en el suelo para: a) girasol, b) maíz y c) soja. (Adaptado de Rubio *et al.*, 2010).

En nuestro país se realizó un muestreo regional con el objetivo de evaluar la presencia de micorrizas autóctonas en los suelos de la Región Pampeana y la efectividad de colonización en tres cultivos (soja, maíz y girasol, Rubio *et al.*, 2010, Figura 5). Los resultados obtenidos demostraron la presencia de los mismos y que la efectividad en la micorrización fue de aproximadamente el 50% en promedio. La efectividad de micorrización se mide evaluando una muestra de raíces que se coloca en una grilla y cuenta el número de casilleros donde se observa la presencia de micorrizas. En los cultivos de soja y maíz los niveles de micorrización estuvieron relacionados en forma negativa de los valores de fósforo del suelo.

Microorganismos que interactúan de forma indirecta con las plantas

Son bacterias u hongos cultivables que se encuentran naturalmente en el suelo. En primer lugar se determinó específicamente en el laboratorio las propiedades benéficas en el crecimiento de las plantas, y posteriormente se realizaron inoculantes en base a alguno

de ellos. Los géneros más estudiados en sus capacidades de promover el crecimiento de las plantas son *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Enterobacter*, *Klebsiella* y *Pseudomonas* (Fuentes-Ramirez y Caballero-Mellado, 2005). En nuestro país se encuentran inoculantes comerciales basados en *Azospirillum*, *Penicillium*, *Bacillus* y *Pseudomonas*.

Los efectos benéficos que tienen estos microorganismos son muy variados: liberación al medio extracelular de compuestos que pueden aumentar la solubilidad de nutrientes (*Pseudomonas*) que también son aprovechados por las plantas, secreción a la rizósfera de compuestos que ejercen un efecto biocontrolador contra microorganismos patógenos (*Bacillus*), entre otros. Los microorganismos crecen preferencialmente cerca de la rizósfera porque las raíces liberan al medio extracelular compuestos carbonados de fácil degradación (Marschner, 2008).

La efectividad de *Azospirillum* como PGPM radica por un lado en su capacidad de fijar nitrógeno sin necesidad de asociarse a las raíces de las leguminosas. Al crecer en la rizósfera de plantas no leguminosas, le aporta una cantidad de nitrógeno extra al de la fertilización (desde 15 hasta 60 kg N ha⁻¹ año⁻¹ con promedios menores a 20 kg N ha⁻¹ año⁻¹; (Okon y Labandera-Gonzales, 1994; Rodrigues *et al.*, 2008). Sin embargo, esta cualidad no es la más importante como PGPM. Los beneficios de *Azospirillum* están relacionados con su capacidad de sintetizar compuestos que promueven el desarrollo del sistema radical, como son las auxinas (Patten y Glick 1996), las citoquininas (Tien *et al.* 1979) y las giberelinas (Cassan *et al.* 2001).

El otro microorganismo destacado como PGPM es *Pseudomonas* spp. Es una bacteria de vida libre cuya principal característica es la capacidad de solubilizar el fósforo que está adsorbido al hierro y al calcio del suelo. Esta habilidad se debe a que este microorganismo secreta una importante cantidad de ácidos orgánicos que disminuyen el pH del suelo, solubilizando el fósforo (Marschner, 2008).

Los inoculantes comerciales basados en *Azospirillum* y *Pseudomonas* se utilizan principalmente en los cultivos de maíz y trigo, siendo más utilizada la inoculación del trigo. Un relevamiento realizado a partir de 385 ensayos de inoculación con diferentes microorganismos en el cultivo de trigo en la Región Pampeada (a excepción de dos ensayos realizados en las provincias de Formosa y Tucumán) se observó que la inoculación aumentó el rendimiento de trigo en un 5% aproximadamente (Figura 6). En la Tabla 2 se detallan las fuentes de los datos indicando la especie de microorganismo utilizado y el sitio donde se realizaron los ensayos utilizados para elaborar la Figura 6.

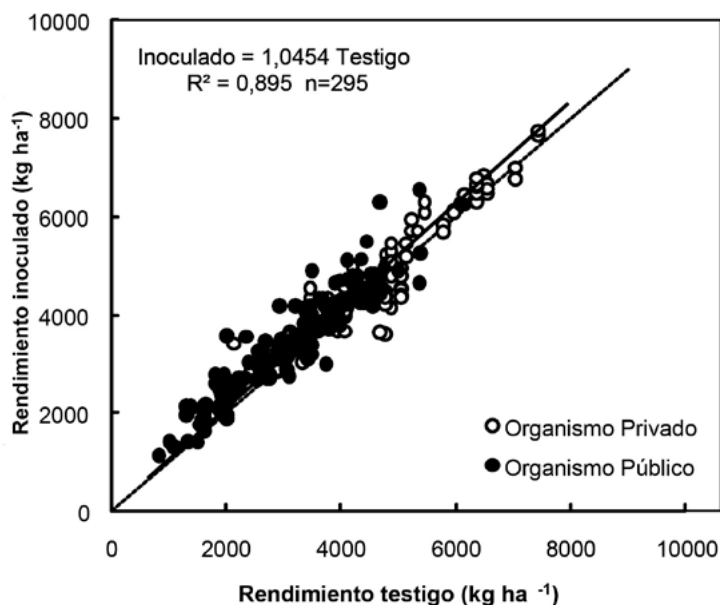


Figura 6. Rendimiento de trigo inoculado con promotores de crecimiento vs. rendimiento del testigo. Los datos fueron obtenidos a partir de informes técnicos realizados por organismos públicos y empresas dedicadas a la comercialización de inoculantes. La línea punteada representa la recta 1:1 y la línea sólida la regresión lineal a los datos. Se testeó que la pendiente de la regresión fuera distinta de 1 y también se verificó la diferencia aplicando un diseño de t-apareada.

Tabla 2. Listado de los informes técnicos utilizados para realizar la Figura 6.

Autor/año	Sitio	Cepa
ORGANISMOS PRIVADOS		
Bilbao & Fernández Palma, 2007	Necochea	<i>Azospirillum</i> ,
Canova, Ridley, Ravera & Lepiscopo, 2006	San Nicolás	<i>Azospirillum</i> ,
González Anta, 2009a	América	<i>Pseudomonas</i>
González Anta, 2009b	Colón	<i>Pseudomonas</i>
Gonzalez Anta, 2009c	Daireaux	<i>Pseudomonas</i>
González Montaner <i>et al.</i> , 2009	Zona Mar y Sierras	No reporta
González Montaner <i>et al.</i> , 2010	Zona Mar y Sierras	No reporta
ORGANISMOS PUBLICOS		
Álvarez & Iglesias, 2003	Arroyo Ceibal	<i>Azospirillum</i>
Avanzini <i>et al.</i> , 2008	Río Cuarto	<i>Azospirillum</i>
Bolletta <i>et al.</i> , 2003	Bordenave	<i>Azospirillum</i> ,
Bono <i>et al.</i> , 2003	Anguil	<i>Azospirillum</i> , otras no reportadas
Capurro <i>et al.</i> , 2010	Oliveros	<i>Azospirillum</i>
Carrasco <i>et al.</i> , 2009	Bordenave	<i>Azospirillum</i>
Covacevich & Echeverria, 2005	Balcarce	<i>Pseudomonas</i>
Cracogna <i>et al.</i> , 2003	Arroyo Ceibal	<i>Azospirillum</i> , <i>Pseudomonas</i>
Diaz Zorita <i>et al.</i> , 2004b	Varios sitios R.P	<i>Azospirillum</i>
Diaz Zorita <i>et al.</i> , 2008a	Varios sitios R.P	<i>Azospirillum</i>
Ferlini, 2006	Castellanos	<i>Azospirillum</i>
Ferlini <i>et al.</i> , 2005	Castellanos	<i>Azospirillum</i>
Firpo <i>et al.</i> , 2004	Paraná	No reporta
Fontaneto <i>et al.</i> , 2010	San Jerónimo Norte	<i>Azospirillum</i>
Gambaudo, 2006	Rafaela	<i>Azospirillum</i>
García, 2006	Arroyo Dulce	<i>Azospirillum</i> , <i>Pseudomonas</i>
García & Bach, 2009	Chivilcoy	<i>Pseudomonas</i>
García & Rossi, 2009	Pergamino	<i>Azospirillum</i> , <i>Pseudomonas</i>
Informe INTA Balcarce, 2010	Balcarce	<i>Azospirillum</i>
Informe INTA Paraná, 2006	Paraná	<i>Azospirillum</i>
Naiman <i>et al.</i> , 2008	Cnel. Pringles	<i>Azospirillum</i> , <i>Pseudomonas</i>
Ojuez <i>et al.</i> , 2005	Bolivar	<i>Azospirillum</i>
Thuar, 2005	Río Cuarto	<i>Azospirillum</i>
Thuar 2007	Río Cuarto	<i>Azospirillum</i>
Toresani 2008	Zaballa	<i>Azospirillum</i> , <i>Pseudomonas</i>
Ventimiglia <i>et al.</i> , 2008	9 de Julio	<i>Azospirillum</i>

En el caso del maíz, se relevaron 50 ensayos realizados por empresas privadas dedicadas a la comercialización de inoculantes y por organismos públicos y se observa que la inoculación aumenta el rendimiento en un 5% (Figura 7). Como se explicó anteriormente se testeó si había diferencias en la respuesta entre los datos de origen privado y público, al ser también similar en este caso se trazó un ajuste conjunto de todos los datos. En la Tabla 3 se detallan las fuentes de los datos por microorganismo y los sitios donde se realizaron los ensayos que se tomaron para realizar la Figura 7.

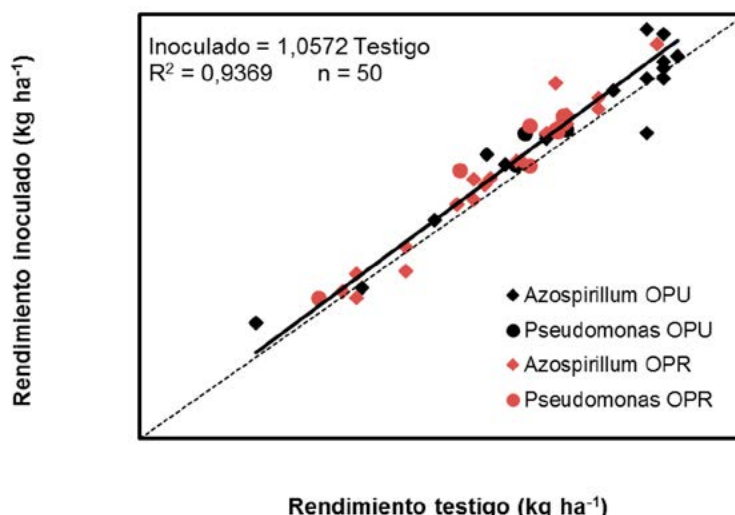


Figura 7. Rendimiento de maíz inoculado con promotores de crecimiento vs. rendimiento del testigo. La línea punteada representa la recta 1:1 y la línea sólida la regresión lineal a los datos. OPU: ensayos realizados por organismos públicos y OPR: ensayos realizados por organismos privados. La pendiente de regresión difirió estadísticamente de 1; el test de t-apareda resultó en conclusiones similares a la recta.

Tabla 3. Listado de los informes técnicos utilizados para realizar la Figura 7.

Autor/año	Sitio	Cepa
ORGANISMOS PUBLICOS		
Thuar <i>et al.</i> , 2008	Río Cuarto	Azospirillum
Diaz-Zorita <i>et al.</i> , 2008b	Varios	Azospirillum
Thuar <i>et al.</i> , 2010	Río Cuarto	Azospirillum
Barraco <i>et al.</i> , 2009	Oeste de Buenos Aires	Azospirillum
García y Bach, 2001	Pergamino	Pseudomonas
Torrens Baudrix <i>et al.</i> , 2007	9 de Julio	Azospirillum
Faggioli <i>et al.</i> , 2007	Marcos Juárez	Azospirillum, Pseudomonas
Carrasco y Zamora 2002	Barrow	Pseudomonas
Fontanetto <i>et al.</i> , 2008	Rafaela	
ORGANISMOS PRIVADOS		
Diaz-Zorita <i>et al.</i> , 2003	Varios	Azospirillum, Pseudomonas
Diaz-Zorita <i>et al.</i> , 2004 b	Varios	Azospirillum, Pseudomonas
Diaz-Zorita <i>et al.</i> , 2005	Varios	Azospirillum, Pseudomonas

La liberación de ácidos orgánicos hacia la rizósfera para aumentar la disponibilidad de fósforo no es efectiva para aumentar la mineralización del P orgánico del suelo. Hay hongos como *Aspergillus*, que sintetizan enzimas llamadas fosfatasas y fitasas que hidrolizan el fósforo orgánico del suelo, liberando fósforo inorgánico potencialmente disponible para las plantas (Richardson *et al.*, 2001). Sin embargo, estudios realizados para evaluar la efectividad de las fitasas en el suelo dieron resultados erráticos (George *et al.* 2005, Marschner, 2008).

Producción de inoculantes en el predio

Si bien el precio de los inoculantes es accesible para cualquier productor, es posible la realización de inoculantes caseros. Es de vital importancia ser muy cuidadosos con la

limpieza durante la realización y manipulación de los productos, ya que la posibilidad de que ocurran contaminaciones es muy factible.

Para la realización del inoculante casero se pueden implementar dos estrategias:

- Multiplicación de inoculantes comerciales.
- Realización de inoculantes a partir de una muestra de suelo.

Cuando la estrategia que se va a emplear es la realización de un inoculante casero a partir de uno comercial, si se mantienen las condiciones de esterilidad de la muestra, lo que lograremos es tener un cultivo puro, es decir de una única especie. Cuando partimos de la realización de inoculantes a partir de una muestra de suelo el principal problema es que en muchas ocasiones no solamente estaremos multiplicando los microorganismos benéficos, sino que también estamos multiplicando microorganismos patógenos. En estos casos es recomendable primero hacer un aislamiento de los microorganismos con los cuales vamos a trabajar.

Primero debemos producir el medio de cultivo donde crecerán los microorganismos. El más recomendable es uno que se realiza con papa y soja (Ortuño *et al.*, 2014). Para realizar este medio de cultivo, se debe hervir en una olla 1kg de papa y 1kg de porotos de soja. Cuando ambos productos están cocidos, se licúan ambos y se filtra con una tela de algodón. Posteriormente se coloca en botellas de vidrio de 250 cm³ llenas por la mitad con un tapón de algodón y tela en en una olla a presión durante 20 min.

Una vez que el medio de cultivo esté frío, ya estamos listos para producir nuestro inoculante. Es necesario ser muy riguroso y seguir los siguientes pasos:

1. Desinfectar con lavandina el lugar donde se va trabajar, manteniendo puertas y ventanas cerradas.
2. Generar un “cono de esterilidad”, que consiste en poner dos mecheros separados por una distancia de 25 centímetros (los mecheros pueden ser de alcohol, que se consiguen en farmacias).
3. Colocar las botellas cerradas dentro del cono y rociarlas con alcohol al 70% (se consigue poniendo en un rociador siete partes de alcohol etílico y tres de agua)
4. Colocar la bolsa del inoculante comercial o nuestra muestra de suelo dentro del cono.
5. Tomar una muestra del inoculante y colocarlo dentro de los frascos.
6. Es necesario que los frascos sean debidamente aireados, para ello se puede adaptar un sistema de aireador de pecera (Ortuño *et al.*, 2014) o colocar en un agitador.
7. Dejar durante 7 días antes de utilizar, permitiendo que los microorganismos se multipliquen.

Uno puede conservar el inoculante en freezer por tiempo indefinido para realizar posteriores inoculantes. Para ello, es necesario colocar en los frascos una vez pasados los 7 días de crecimiento, 25 ml de glicerina líquida.

Bibliografía

ÁLVAREZ I, MC IGLESIAS. 2003. Inoculación mixta de Rhizobium - Azospirillum con y sin fertilizantes, su impacto en el cultivo de trigo (*Triticum aestivum* L.). Universidad Nacional del Nordeste, Comunicaciones Científicas y Tecnológicas 2003. Disponible en: www.unne.edu.ar.

- ÁLVAREZ R, HS STEINBACH, JL DE PAEPE. 2015. Capítulo 4: Nitrógeno. En: Fertilidad de suelos y fertilización de la Región Pampeana. R Álvarez (Ed.). Editorial Facultad de Agronomía.
- ARIAS N. 2008. La soja utiliza el nitrógeno del aire. Disponible en: <http://www.inta.gov.ar/concepcion/informacion/boletines/hie/02/67.htm>
- AVANZINI G, J ANDRES, C BRUNO, P PEREZ ALUFFI, A THUAR, F ALTAMIRANO, C OLMEDO. 2008. Evaluación del efecto de la inoculación con dos cepas PGPR, en un cultivo de trigo a campo. Actas XXI Congreso Argentino de Ciencia del Suelo. San Luis, Argentina.
- BAREA JM, RAZCON, CAZCON-AGUILAR. 2005 Capítulo 10: Interactions between mycorrhizal fungi and bacteria to improve plant nutrient cycling and soil structure. En: Microorganisms in soil; roles in genesis and functions. F BUSCOT, A VARMA. (Eds.). Springer: 195-212.
- BARRACO M, C ÁLVAREZ, C SCIANCA. 2009. Estrategias de fertilización de maíz. Jornada Agrofutura. Trenque Lauquen. INTA Estación Experimental Agropecuaria General Villegas.
- BILBAO A, E FERNANDEZ PALMA. 2007. Azospirillum brasilense y Micorrizas en Trigo, en el Sudeste de Buenos Aires. Campaña 2006/07. Disponible en: www.crinigan.com.
- BOLLETTA A, S VENANZI, H KRÜGER. 2003. Respuestas del cultivo de trigo a la inoculación con biofertilizantes en el sur de la provincia de Buenos Aires. Disponible en: www.inta.gov.ar
- BONO A, JP FERNANDEZ, D FUNARO, A QUIROGA. 2003. Aplicación de microorganismos promotores de crecimiento. TRIGO- Actualización 2003. Pág 116-124.
- CANOVA D, N RIDLEY, I RAVERA, E L'EPISCOPO. 2006. Ensayo Inoculantes y fertilización Trigo - Campaña 2005/06. Disponible en: www.crinigan.com.
- CAPURRO J, JM MONTI, M PUENTE, J GARCIA, MC GONZALEZ, A PERTICARI. 2010. Respuesta de trigo a la inoculación con Azospirillum sobre diferentes niveles de fertilización. Para mejorar la producción 43-INTA EEA Oliveros 2010. Pág 57-59.
- CARRASCO N, M ZAMORA. 2002. Evaluación de inoculantes con bacterias solubilizadoras de fósforo en maíz. Disponible en: http://www.inta.gov.ar/barrow/info/documentos/agricultura/Maiz/informe_inocul_solubiliz.pdf
- CARRASCO N, M ZAMORA, A MELIN. 2009. Evaluación de biofertilizantes en trigo en el Centro Sur Bonaerense. Disponible en: www.inta.gov.ar
- CASSAN, F., LUCANGELI, C., BOTTINI, R., P PICCOLI. 2001. Azospirillum spp. metabolize [17,17-2H₂] gibberellin A20 to [17,17-2H₂] gibberellin A1 in vivo in dy rice mutant seedlings Plant and Cell Physiology. 42: 763-767.
- COVACEVICH F, HE ECHEVERRIA. 2005. Evaluación de inoculantes de Pseudomonas en Trigo asociados a la fertilización. Ensayo a campo con Rizofos Líquido Trigo con Instituciones Oficiales. Disponible en: www.rizobacter.com.ar
- COVACEVICH F, S VARGAS GIL. 2014. Aporte de los microorganismos edáficos a la nutrición vegetal. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos.
- CRACOGNA MF, MC IGLESIAS, I DIAZ, N GONZALES, ML CARBAJAL. 2003 Utilización de Azospirillum y bacterias solubilizadoras de fósforo en el cultivo de trigo. Universidad Nacional del Nordeste, Comunicaciones Científicas y Tecnológicas 2003. Disponible en: www.unne.edu.ar.
- DEY R, KK PAL. DM BHATT, SM CHAUHAN. 2004. Growth promotion and yield enhancement of peanut (Arachis hypogaea L.) by application of plant growth-promoting rhizobacteria. Microbiological Research 159: 371-394.

- DIAZ ZORITA M, RM BALIÑA, MV FERNANDEZ CANIGIA. 2003. Resumen de resultados de investigación y desarrollo aplicado. Nitragin, 64p.
- DIAZ ZORITA M, RM BALIÑA, MV FERNANDEZ CANIGIA. 2004 a. Resumen de resultados de investigación y desarrollo aplicado. Nitragin, 44p.
- DIAZ ZORITA M, RM BALIÑA, MV FERNANDEZ CANIGIA. 2005. Resumen de resultados de investigación y desarrollo aplicado. Nitragin, 40p.
- DIAZ ZORITA M, RM BALIÑA, MV FERNANDEZ CANIGIA, A PERTICARI. 2004 b. Producción de trigo inoculado con bacterias promotoras de crecimiento vegetal. A todo trigo. Un congreso para todos. Federación de Centros y Entidades Gremiales de Acopiadores de Cereales. Mar del Plata. Disponible en: www.inta.gov.ar
- DIAZ-ZORITA M, FG MICUCCI, RM BALIÑA, MV FERNANDEZ CANIGIA. 2008b. Productividad de cultivos de maíz con tratamientos de semillas con *Azospirillum brasilense*. Actas XXI Congreso Argentino de Ciencia del Suelo. San Luis.
- DIAZ-ZORITA M, RM BALIÑA, FG MICUCCI, MV FERNANDEZ CANIGIA. 2008a. Respuesta de trigo al tratamiento de semillas con *Azospirillum brasilense*. Actas XXI Congreso Argentino de Ciencia del Suelo. San Luis, Argentina.
- DOUDS JR, NC JOHNSON. 2007. Capítulo 7: Contributions of arbuscular mycorrhizas to soil biological fertility. En: Soil biological fertility - A key to sustainable land use in agriculture. LK ABBOTT, DV MURPHY (Eds). Springer: 129-162.
- FAGGIOLI VS, CR CAZORLA, A VIGNA, MF BERTI. 2007. Fertilizantes biológicos en maíz. Ensayo de inoculación con cepas de *Azospirillum brasilense* y *Pseudomonas fluorescens*. Disponible en: <http://www.inta.gov.ar/mjuarez/info/documentos/Suelos/fertbio-07res.htm>.
- FAO. 1995. Manual técnico de la fijación del nitrógeno. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma.
- FERLINI HA. 2006. Evaluación del uso de diferentes dosis de *Azospirillum brasilense*, en trigo duro (*Triticum aestivum*). Disponible en: www.engormix.com
- FERLINI HA, SC DIAZ, CO TRAUT. 2005. Beneficios del uso de inoculantes sobre la base de *Azospirillum brasilense* en cultivos extensivos de granos y forrajes. Universidad Nacional del Nordeste, Comunicaciones Científicas y Tecnológicas 2005. Disponible en: www.unne.edu.ar.
- FIRPO R, D SANTOS, HF PELTZER. 2004. Inoculación de Trigo con *Azospirillum*: su efecto sobre el rendimiento ante distintas dosis de urea. Disponible en: www.inta.gov.ar
- FONTANETO H, O KELLER, D GIAILEVRA, C NEGRO, L BELOTTI. 2008. Efecto del fósforo y de promotores del crecimiento vegetal en maíz. Campaña 2007/08. Disponible en: http://www.inta.gov.ar/rafaela/info/documentos/miscelaneas/112/misc112_030.pdf
- FONTANETO H, O KELLER, S GAMBAUDO, N SOSA, L BELOTTI, C NEGRO, D GIAILEVRA, J ALBRECHT, H BOSCHETTO. 2010. Efecto de un promotor biológico del crecimiento vegetal y de la fertilización en trigo. Información técnica de trigo y otros cultivos de invierno, campaña 2010. Publicación Miscelánea N° 116. Pág. 50-56.
- FUENTES-RAMIREZ LE, J CABALLERO-MELLADO. 2005. Capítulo 5: Bacterial Biofertilizers. En: PGPR: Biocontrol and Biofertilization. Z.A. Siddiqui (Ed.). Springer: 143-172.
- GAMBAUDO S, E MONTELEONE, A KOSINSKY, O LOPEZ, C FOLLET. 2006. Evaluación de *Azospirillum brasilense* en el cultivo de trigo. Disponible en: www.nitrasoil.com.ar.
- GARCIA R. 2006. Bacterias promotoras de crecimiento de las plantas: resultados de ensayos 2005. Disponible en: www.inta.gov.ar.

- GARCIA R, R ROSSI. 2009. Efecto de la inoculación con bacterias promotoras de crecimiento sobre la producción de trigo. Proyecto Regional: Desarrollo y difusión de tecnología para la producción ecológica. Informe Técnico 2009 del Centro Regional Buenos Aires Norte. Pág. 209-212.
- GARCIA R, T BACH. 2009. Efecto de la inoculación con *Pseudomonas* sobre el rendimiento de trigo. Proyecto Regional: Desarrollo y difusión de tecnología para la producción ecológica. Informe Técnico 2009 del Centro Regional Buenos Aires Norte. Pág. 194-200.
- GARCIA R, T BACH. 2001. Efecto de bacterias solubilizadoras de fósforo sobre el rendimiento de maíz. VII Congreso Nacional de Maíz. Pergamino.
- GEORGE TS, AE RICHARDSON, RJ SIMPSON. 2005. Behaviour of plant-derived extracellular phytase upon addition to soil. *Soil Biology and Biochemistry* 37: 977-988.
- GONZALEZ ANTA G. 2009a. Ensayos Rizobacter América. Disponible en: www.rizobacter.com.ar.
- GONZALEZ ANTA G. 2009b. Ensayos Rizobacter Colón. Disponible en: www.rizobacter.com.ar.
- GONZALEZ ANTA G. 2009c. Ensayos Rizobacter Daireaux. Disponible en: www.rizobacter.com.ar.
- GONZALEZ MONTANER JH, MR DI NAPOLI, A QUATTOCCHIO, J ANDENOCHE, M PORSBORG, F DODORICO. 2009. Rizobacterias promotoras de crecimiento en trigo. AACREA Zona Mar y Sierras, Resultados de experimentación en cosecha fina 2008/09. Pág. 24-30.
- GONZALEZ MONTANER JH, MR DI NAPOLI, A QUATTOCCHIO, J ANDENOCHE, M PORSBORG, F DODORICO. 2010. Rizobacterias promotoras de crecimiento en trigo. Resultados de ensayos 2009/10. Zona Mar y Sierras. Disponible en: www.crinigan.com.
- GUTIERREZ-BOEM FH. 2008. Capítulo 4: Nutrición del cultivo de soja. Inoculación y respuesta a la fertilización. En: Producción de soja. E SATORRE (Ed.). AACREA: 45-53.
- HERRIDGE DF, JE TURPIN, MJ ROBERTSON. 2001. Improving nitrogen fixation of crop legumes through breeding and agronomic management: analysis with simulation modelling. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 41: 391-401.
- INFORME INTA BALCARCE .2010. Informe final ensayo inoculante graminoil-I en trigo Balcarce - campaña 2009-2010. Disponible en: www.nitrasoil.com.ar.
- INFORME INTA PARANA. 2006. Efecto de la inoculación biológica sobre el rendimiento de un cultivar de trigo de ciclo corto. Disponible en: www.nitrasoil.com.ar.
- KUMAR V, N NARULA. 1999. Solubilization of inorganic phosphates and growth emergence of wheat as affected by *Azotobacter chroococcum* mutants. *Biology and Fertility of Soils* 28: 301-305.
- LUCY M, E REED, BR GLICK. 2004. Applications of free living plant growth-promoting rhizobacteria. *International Journal of General and Molecular Microbiology* 86: 1-25.
- MARSCHNER P. 2008. Capítulo 8: The role of rhizosphere microorganisms in relation to P uptake by plants. En: The ecophysiology of plant-phosphorus interactions PJ WHITE, JP HAMMOND (Eds.). Springer: 165-176.
- MCNEILLA, M UNKOVICH. 2007. Capítulo 2: The Nitrogen Cycle in Terrestrial Ecosystems. En: Nutrient Cycling in Terrestrial Ecosystems. P MARSCHNER, Z RENGEL (Eds.). Springer: 34-64.

- NAIMAN AD, AE LATRONICO, IE GARCIA DE SALAMONE. 2008. Efecto de la inoculación de trigo con PGPR sobre su rendimiento biológico y la flora bacteriana rizosférica. Actas del XXI Congreso Argentino de Ciencia del Suelo. San Luis, Argentina.
- OJUEZ C, A LAURIC, R SIOLOTTO, G FERRARIS. 2005. Efecto de la Fertilización Fosforada y la utilización de *Azospirillum* sobre el rendimiento del cultivo de Trigo. Campaña 2004-05. Disponible en: www.inta.gov.ar.
- OKON Y, CA LABANDERA-GONZALES. 1994. Agronomic applications of *Azospirillum*: an evaluation of 20 years worldwide field inoculation. *Soil Biology and Biochemistry* 26: 1591 -1601.
- ORTUÑO N, CLAROS M, ANGULO V, NAVIA O, E MENESES. 2014. Biofertilizantes artesanales con microorganismos rizosféricos nativos para una producción orgánica de quinua en Bolivia. Disponible en: <http://nuestra-maestria-agroecologica.jimdo.com/biblioteca-pdf/fertilizantes-organicos/>
- PATTEN CL, BR GLICK. 1996. Bacterial biosynthesis of indole-3-acetic acid. *Canadian Journal of Microbiology* 42: 207-220.
- PERTICARI A, M PUENTE, E ECHEGARAY, C PICCINETTI. 2007. Capítulo 17: Uso eficiente de los inoculantes y de la fijación biológica de nitrógeno. En: De la biología del suelo a la agricultura. AM THUAR, FD CASSAN, CA OLMEDO (Compiladores). Universidad de Río Cuarto: 275-291.
- POOLE EJ, GD BENDING, JM WHIPPS, DJ READ. 2001. Bacteria associated with *Pinus sylvestris*-*Lactarius rufus* ectomycorrhizas and their effects on mycorrhiza formation in vitro. *New Phytologist* 151: 743-751.
- RACCA RW, N GONZALEZ. 2007. Capítulo 4: Nutrición nitrogenada de la alfalfa e impacto de la fijación biológica del nitrógeno. En: El cultivo de la alfalfa en la Argentina. DH BASIGALUPO (Ed.). Ediciones INTA: 67-79.
- RICHARDSON AE, PA HADOBAS, JE HAYES. 2001. Extracellular secretion of *Aspergillus* phytase from *Arabidopsis* roots enables plants to obtain phosphorus from phytate. *The Plant Journal* 25(6): 641-649.
- RODRIGUES EP, LS RODRIGUES, AL MARTINEZ DE OLIVEIRA, VLD BALDANI, KR DOS SANTOS TEIXEIRA, S URQUIAGA, VM REIS. 2008. *Azospirillum amazonense* inoculation: effect on growth yield and N fixation of rice (*Oryza sativa* L.). *Plant and Soil* 302: 249-261.
- RUBIO G, MC FERNANDEZ, FH GUTIERREZ BOEM. 2010. Micorrización natural de cultivos de soja, girasol y maíz en la Región Pampeana. Actas XXII Congreso Argentino de la ciencia del suelo. Rosario. Actas en CD.
- RUSSO A, C FELICI, A TOFFANIN, M GÖTZ, C COLLADOS, JM BAREA, MOËNNE-LOC-COZ, K SMALLA, J VANDERLEYDEN, M NUTI. 2005. Effect of *Azospirillum* inoculants on arbuscular mycorrhiza establishment in wheat and maize plants. *Biology and Fertility of Soils* 41: 301-309.
- SALVAGIOTTI F, KG CASSMAN, JE SPECHT, DT WALTERS A WEISS, A DOBERMANN. 2008. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. *Field Crops Research* 108: 1-13.
- SMITH SE, DJ READ. 1997. Capítulo 5: Mineral nutrition, heavy metal accumulation and water relations of VA mycorrhizal plants. En: *Mycorrhizal Symbiosis* (Second Edition). Smith, S.E. y D.J (Eds.). London, Academic Press: 126-160.
- SPAINK HK. 2000. Root nodulation and Infection factors produced by rhizobial bacteria. *Annual Review Microbiology* 57: 257-288.

- THUAR A. 2005. Evaluación del Efecto de la Inoculación en Trigo con *Azospirillum brasilense* a Campo. Disponible en: www.nitrasoil.com.ar.
- THUAR A. 2007. Evaluación del Efecto de la Inoculación en Trigo con *Azospirillum brasilense* a Campo. Disponible en: www.nitrasoil.com.ar.
- THUAR AM, J CANTERO, C OLMEDO. 2008. Evaluación del efecto de la inoculación en maíz con *Azospirillum brasilense* bajo diferentes formulaciones comerciales y dosis de fertilizantes. Actas XXI Congreso Argentino de Ciencia del Suelo. San Luis.
- THUAR AM, J CANTERO, C OLMEDO. 2010. Evaluación del efecto de la inoculación en maíz con *Azospirillum brasilense* bajo diferentes condiciones de riego y dosis de fertilizantes. Actas XXII Congreso Argentino de Ciencia del Suelo. Rosario.
- TIEN TM, MH GASKINS, DH HUBBELL. 1979. Plant growth substances produced by *Azospirillum brasilense* and their effect on the growth of pearl Millet (*Pennisetum americanum* L.). *Applied Environmental Microbiology* 37: 1016-1024.
- TORESANI A. 2008. Evaluación del inoculante Crinigan para trigo, en ensayos de invernáculo y a campo. Disponible en: www.crinigan.com.
- TORRENS BAUDRIX L, LA VENTIMIGLIA, J CAMARASA. 2007. *Azospirillum* spp y *Bacillus* spp en Maíz. Disponible en: <http://www.inta.gov.ar/PERGAMINO/info/documentos/ext09/9jul07/AzospirillumspPyBacillusppenMa%C3%ADz.pdf>.
- VENTIMIGLIA L, L TORRES BAUDRIX, J CAMARASA. 2008. Uso de fertilizantes y promotores de crecimiento en trigo. Disponible en: www.fertilizando.com.
- WANG B YL QIU. 2006. Phylogenetic distribution and evolution of mycorrhizas in land plants. *Mycorrhiza* 16: 299-363.
- ZAMORA M, JI MASSIGOGE. 2002. Inoculación de soja en el centro sur bonaerense. Disponible en: <http://www.inta.gov.ar/barrow/info/documentos/agricultura/soja/informeinoculac.pdf>.

MANEJO DE LOS NUTRIENTES EN PLANTEOS DE PRODUCCIÓN ORGÁNICA

Patricia L. Fernández y Carina R. Álvarez

Introducción

El manejo de los nutrientes en los sistemas de producción agrícola debe considerar la movilidad de los mismos en el suelo, los mecanismos y la curva de absorción por los vegetales y el ciclo biogeoquímico (vías de entradas y salidas, y transformaciones). En los planteos de producción orgánica se busca sostener la fertilidad edáfica, manteniendo el balance de los nutrientes compensando las salidas (concepto de sustentabilidad) y minimizando las pérdidas.

La producción de cultivos y de animales remueve nutrientes desde el suelo, los cuales son exportados del sistema. Estas pérdidas conllevan a disminuciones de nutrientes en el suelo y en la calidad del mismo.

Entre las prácticas que atienden al objetivo de balance cero se encuentran: la aplicación de abonos orgánicos que permiten el ingreso de nutrientes; la presencia de especies leguminosas fijadoras de N en la rotación; la incorporación de fertilizantes minerales naturales y la integración de la producción animal y vegetal dentro del mismo lote. Cabe destacar, que los abonos orgánicos deben estar compostados adecuadamente para destruir los patógenos presentes. También, al igual que los fertilizantes minerales naturales, deben estar libres de contaminantes, como metales pesados o sustancias peligrosas.

Finalmente, para alcanzar una buena fertilidad de los suelos y sostener una buena condición física se propone la integración de actividades, no sembrar el mismo cultivo en forma sucesiva sino promover la rotación de cultivos, incluir leguminosas en la rotación, sembrar cultivos asociados (intercalar cultivos en el mismo lote), utilizar cultivos de cobertura, entre otras prácticas.

Nitrógeno

El nitrógeno (N) se caracteriza por su alta movilidad en el suelo, siendo la absorción por la planta a través de flujo masal. El conocimiento práctico del ciclo del N es la clave para un manejo adecuado de este nutriente. Una de las vías de entrada del N al sistema es mediante fijación biológica. La posibilidad de incorporar el N atmosférico a través de la fijación biológica permite que el sistema productivo alcance un balance cero o menos negativo de este nutriente, sin necesidad de transferir N desde otro sistema.

La fijación simbiótica de N en leguminosas puede verse afectada por la cantidad de nitratos que se encuentren en el suelo. Así, puede afectarse tanto la formación como la cantidad de nódulos. Hasta el momento no se ha determinado un valor umbral de nitratos a partir del cual no se lleve a cabo la nodulación. Sin embargo, lo que se ha observado es una reducción del N proveniente de fijación en la medida que aumenta el N disponible del suelo. Una manera de observar a campo la actividad de fijación es descalzar algunas plantas y observar la presencia y cantidad de nódulos, su coloración y presionar los mismos para ver si internamente poseen color rosado. El color rosado indica la presencia de leghemoglobina y, por lo tanto, que los nódulos están activos.

Por otro lado, a la siembra del cultivo se requiere de cierta cantidad de N mineral del suelo ya que la fijación simbiótica comienza al menos 10-20 días después de la infección. En términos generales, la fijación comienza 30 días después de la siembra y aumenta hasta alcanzar un máximo durante el período reproductivo y disminuye durante el llenado de los granos. La cantidad de N que se fijará durante el período del cultivo, estará relacionado con la cantidad de biomasa aérea que genere el mismo. A partir de la Ecuación 1 se puede estimar la cantidad de N fijado en función de la cantidad de biomasa en R6 para el cultivo de soja. Esta ecuación se obtuvo a partir de 86 ensayos distribuidos en una gran superficie del país (Collino et al., 2015).

N fijado biológicamente (kg N / ha) = $-32.32 + 0.0221 * \text{biomasa aérea en R6 en materia seca (kg / ha)}$ (n=86; R²=0.53) **[Ecuación 1]**

El estadio R5-R6 del cultivo de soja se corresponde con el momento en el que se debería incorporar el cultivo cuando se usa como abono verde o cultivo de cobertura. Es importante, tener en cuenta que en la medida que el cultivo avanza, la proporción de granos aumenta, y esta estructura de la planta posee una tasa de descomposición más lenta. También, extender el ciclo del cultivo de cobertura o abono verde puede tener efectos negativos por competencia con el cultivo comercial siguiente, por ejemplo en términos de agua del suelo, si no hay un barbecho que permita recargar el perfil del suelo con agua.

En la Figura 1 se ejemplifica una sucesión de cultivos con diferentes objetivos, en el que media un período de barbecho de 3 meses. Durante el período de barbecho el abono verde de soja comienza a descomponerse y a liberar N disponible. El aporte neto de N se corresponde con la cantidad de N fijado. A partir de la Ecuación 1 puede estimarse la cantidad de N que entra en el sistema. Por ejemplo, en el caso de contabilizar una cantidad de biomasa aérea seca en R6 de 5000 kg/ha, el aporte de N por fijación sería de 78 kg N/ha. Si posteriormente se realiza un cultivo de trigo con un rendimiento de 3.5 t/ha, exporta 78 kg N/ha. Si se considera la cantidad de N fijado biológicamente durante el cultivo de soja y la cantidad de N extraído en el grano de cosecha, esta relación es 1, o sea el balance es 0.

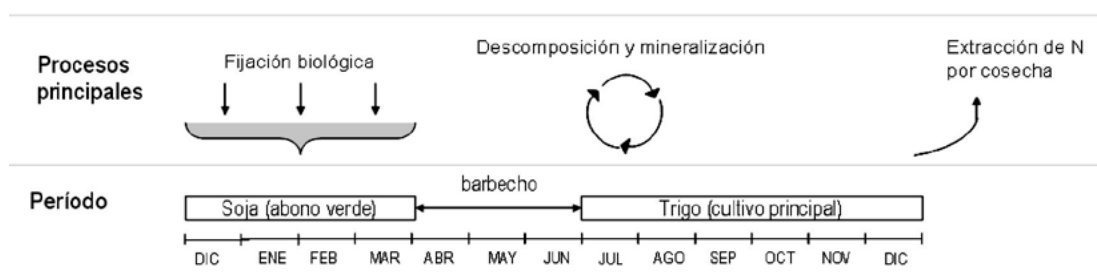


Figura 1. Esquema de rotación con abono verde estival (soja) seguido por un cultivo de trigo.

El cultivo de vicia, también leguminosa, puede resultar en una opción como fijadora de N pero durante el período invernal. Así puede ser una fuente de N para el siguiente cultivo, que podría ser maíz. La vicia con una producción de 3 t/ha fijaría aproximadamente 60 kg N/ha (Álvarez et al., 2015). Considerando un maíz de 8 t/ha y una extracción por cosecha de 120 kg N/ha. significaría que para poder compensar la salida de N mediante la cosecha de grano se necesitan 2 años de vicia.

Los sistemas de producción que combinan la actividad ganadera con la agricultura pueden resultar una opción más fácil para alcanzar el objetivo de compensar las salidas con las entradas. Esto es porque la capacidad de fijación de los cultivos plurianuales (alfalfa, tréboles) es muy superior a la de leguminosas anuales. Los cultivos perennes tienen un alto potencial para acumular carbohidratos y N durante la estación de crecimiento, y generar reservas, en raíces y corona. Las reservas se utilizan para el inicio de la próxima estación de crecimiento. Esto hace que presenten una ventaja competitiva en la etapa de crecimiento inicial, ya que las reservas le proveen el N, supliendo la baja mineralización en las etapas iniciales del ciclo de crecimiento. Cuando se trata de situaciones que conviven especies gramíneas y leguminosas, éstas últimas son capaces de abastecer gran parte del nitrógeno requerido por las gramíneas.

Durante la pastura se incrementa la fracción orgánica del N, que es la fuente principal del N para los cultivos del ciclo agrícola. Asimismo, si las pasturas son consociadas con gramíneas se favorece el aumento de la materia orgánica del suelo, especialmente de la fracción más lábil de la misma.

En la Ecuación 2 que surge a partir del análisis de Racca *et al.* (2001) (Álvarez y Steinbach, 2010), se puede estimar la cantidad de N fijado a partir de la materia seca producida por un alfalfar.

$$\text{N fijado (kg N/ha/año)} = -45 + 26 * \text{materia seca (t/ha/año)} \quad \text{[Ecuación 2]}$$

En el caso de que el cultivo de alfalfa tuviese una producción de 10 t/ha/año de producción de materia seca la cantidad de N fijado sería de 215 kg N/ha/año. Este cultivo plurianual se lo maneja dejándolo durante 4 años y, por lo tanto, fija 860 kg N/ha. Teniendo en cuenta la exportación de un trigo de 3.5 t/ha (78 kg N/ha) y en maíz de 8 t/ha (120 kg N/ha), las exportaciones por cosecha serían de 198 kg/ha en la suma de ambos cultivos. O sea, que con un año de alfalfa se compensa la exportación de un trigo y de un maíz y con cuatro años que dura la misma se cubrirían las exportaciones de 4 cultivos de trigo y cuatro de maíz. Si los cultivos de cosecha anuales son leguminosas las exportaciones a cubrir serían menores.

Otro factor muy importante a manejar es la disponibilidad de N (nitratos) para el cultivo. Esta disponibilidad resulta del nitrato presente en el suelo, del N que es liberado mediante el proceso de descomposición de residuos del cultivo antecesor y de la mineralización de la materia orgánica o abonos. El período de barbecho, tiempo entre dos cultivos, resulta fundamental para que se produzca la liberación y acumulación de nitratos. Los procesos involucrados son la descomposición de residuos o abonos y la mineralización de la materia orgánica.

La liberación de nutrientes desde un residuo dependerá en primera instancia de la relación C/N del mismo, cuanto mayor es esta relación (> 30:1) mayor será la inmovilización y por lo tanto la cantidad de N disponible para el próximo cultivo será menor. Cuando el cultivo previo al barbecho fue una leguminosa con objetivo de ingresar N mediante fijación, el momento de incorporación del cultivo será clave por la cantidad de N fijado y de tiempo

para su liberación. Por otro lado, otro factor que se deberá considerar es la incorporación del rastrojo al suelo (enterrado) o la permanencia del mismo en superficie. También se deben considerar las condiciones ambientales, siendo las precipitaciones y la temperatura las variables fundamentales que determinarán la velocidad de descomposición. Así, por ejemplo, dentro de la región pampeana, cada subregión presentará diferentes tasas de liberación (Figura 2 a, b,c).

En la Figura 2 se muestra la caída de N en los residuos en un plazo de 200 días en la Pampa Ondulada, Pampa Semiárida y Sudeste Bonaerense. En el caso de la Pampa Ondulada disminuye el N dentro de un mismo plazo debido a las condiciones climáticas que favorecen la descomposición de los rastrojos. Se puede resaltar también que la cantidad de N liberado desde el cultivo de soja es mayor que el de maíz, lo cual es lo esperable debido a su baja relación C/N. El rastrojo de maíz también libera una importante cantidad de N y esto es debido al gran volumen de residuos que produce aunque con una alta relación C/N. Además, se puede observar que la tasa de liberación de N desde los rastrojos es mayor en las situaciones donde se incorpora respecto de los que permanecen en superficie (siembra directa). En síntesis, la realización de labranzas, así como la incorporación de rastrojos, tienden a aumentar la disponibilidad de N para el cultivo principal. Si este manejo es realizado con mucha anticipación a los requerimientos del cultivo, el N puede perderse por lixiviación antes de ser absorbido.

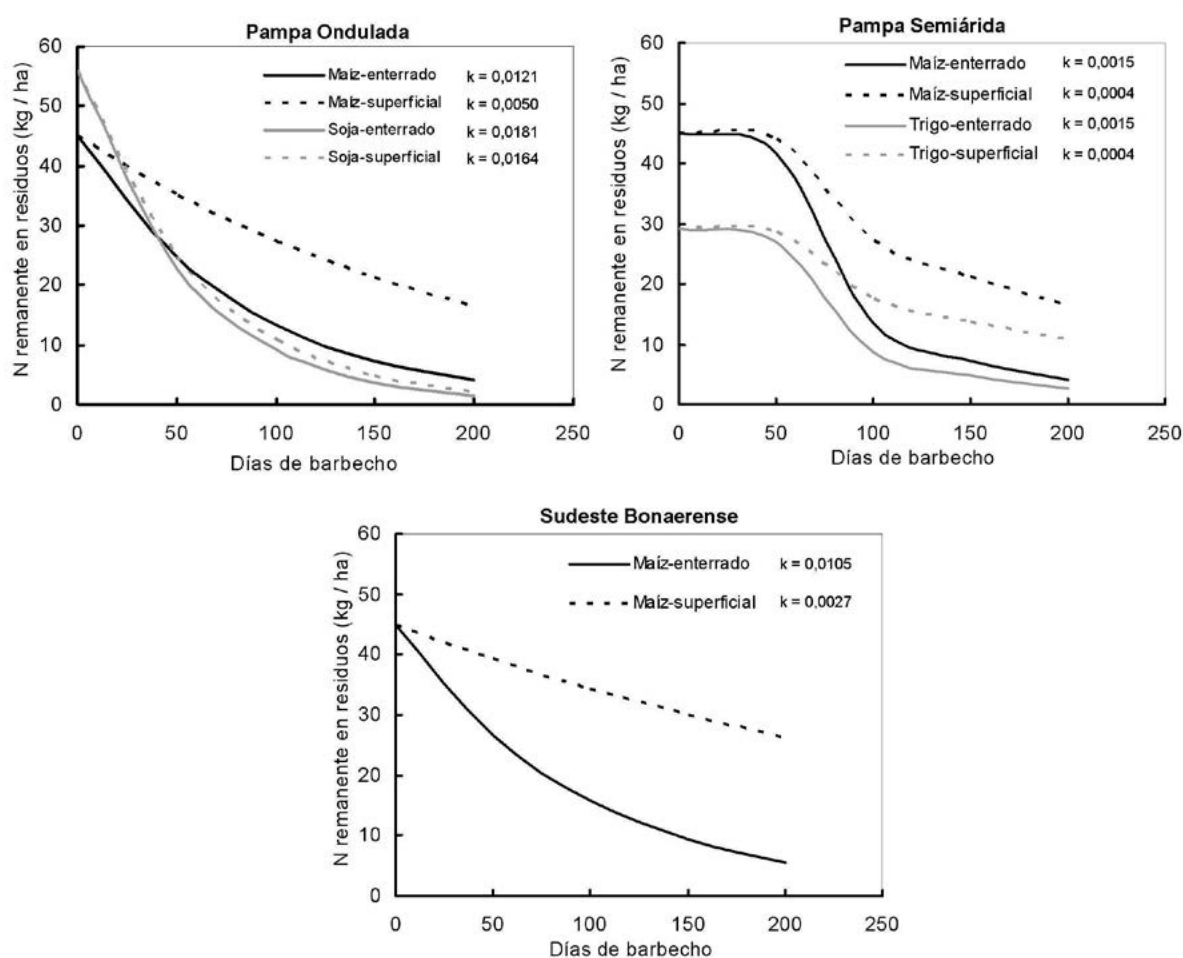


Figura 2. N liberado desde el residuo (kg/ha) en función de la cantidad de días de barbecho para la Pampa Ondulada; Pampa Semiárida; Sudeste Bonaerense. Rendimiento de maíz = 8 t/ha; soja = 4 t/ha; trigo = 3.6 t/ha. La ecuación utilizada fue: $N_{\text{remanente}} = N_{\text{inicial}} * e^{-kt}$, donde: t es tiempo (días), y k depende del cultivo y la posición enterrada o en superficie (se presenta al lado de la leyenda) (Álvarez *et al.*, 2008; Bono y Álvarez, 2012; Creus *et al.*, 1998).

Durante el período de barbecho, el N que se libera y que se encuentra disponible a la siembra del siguiente cultivo no corresponde solo al producto de la descomposición sino también de la mineralización proceso que libera, entre otros nutrientes, al N de la materia orgánica del suelo (MO). Para ello, en el *Capítulo de nitrógeno* se presenta la tasa de mineralización de N orgánico. De este modo, por ejemplo, para la Pampa Ondulada, se puede estimar la tasa de mineralización para un período como el de barbecho. Si éste último comprendiera los meses de abril a junio, entonces la tasa de mineralización de N sería de 0,66%. Esto quiere decir que a partir del porcentaje de la MO, sabiendo que la relación C:N de la MO es aproximadamente de 10:1 y que esta tasa fue obtenida para los primeros 30 cm del suelo y conociendo la densidad aparente obtenida a campo o estimada (ej. 1.3 t/m³), puede obtenerse la cantidad de N en kg/ha de N liberado por mineralización.

Otra de las fuentes de N al sistema es la que proviene de los compost o lombricompostos u otros abonos orgánicos. La particularidad de estos abonos es la variación en la concentración de N que puede presentar en su composición. Sin embargo, en la compilación de trabajos en los que el compost fue fuente de N se obtuvo un promedio, por ejemplo, para la cama de ave de 2.4% de N (Capítulo 6). Así, por ejemplo, si la exportación de un maíz de 8 t/ha es de 135 kg N/ha, se deberían aplicar 5.6 t/ha de cama de ave para compensar esa cantidad de N que salió del sistema.

De acuerdo al resultado encontrado por Ehgball *et al.* (2002) la descomposición durante el primer año es de 55% para el estiércol de gallina. Por lo tanto, si la aplicación de compost es de 5.6 t/ha, el 55% es la tasa de mineralización del mismo quedando disponible en 74.4 kg N/ha durante el primer año luego de la aplicación.

El N disponible puede perderse del sistema en forma gaseosa, a través de la desnitrificación y volatilización, o a través del movimiento de agua por lixiviación y escurrimiento. Las pérdidas pueden ser aún mayores durante el período de barbecho, dependiendo del tipo de paisaje, de la condición de suelo, de la presencia de cultivos de cobertura, etc. Por lo tanto, hacer un buen manejo del N en el sistema implica, también, controlar o minimizar las pérdidas del mismo. Se debe canalizar el N disponible hacia los productos cosechables o almacenarlo en algún componente orgánico (materia orgánica, cultivo de cobertura; Heckman *et al.*, 2009).

Cuando los barbechos son largos, como puede ser en una rotación soja-maíz o maíz-soja, permaneciendo el suelo sin cultivo durante todo el invierno, la alternativa puede ser la siembra de cultivos de cobertura. El cultivo de cobertura (en este caso durante el invierno) permitiría retener en sus estructuras el N, evitando así pérdidas por lixiviación por ejemplo. Para que el N del cultivo de cobertura esté disponible en el cultivo siguiente es importante evaluar el momento de secado del mismo.

Otra estrategia para minimizar las pérdidas es sincronizar la oferta N mineral con la demanda. La demanda de N por parte del cultivo, y las recomendaciones de manejo de la fertilidad, están relacionadas con los ciclos de producción, según sea de tipo anual o tipo perenne. Los cultivos anuales alcanzan su madurez en una sola estación de crecimiento. El patrón de crecimiento, es decir, la acumulación de materia seca, es similar a la absorción de N. El patrón con el que se acumula N sigue una curva sigmoidea, en la cual pueden reconocerse 3 fases. Una primera fase, en el cual el crecimiento de la planta y la absorción de N son relativamente bajos. En la segunda fase de crecimiento, hay un período de absorción rápida de N que se corresponde con un crecimiento vegetativo rápido. Dependiendo del cultivo, en esta etapa se absorbe entre el 50 - 85% del N total requerido por las plantas. A madurez del cultivo, disminuye la tasa de absorción de N y comienza a

traslocarse el N acumulado hasta ese momento. Siendo el destino principal los órganos reproductivos.

En la Figura 3 se presenta como se acompaña el proceso de mineralización de nitrógeno con la demanda de los cultivos de trigo y maíz en la Pampa Ondulada. El cultivo de maíz, debido a que presenta mayor sincronización con la mineralización, recibe una mayor contribución desde esta fuente. Por otro lado, el trigo va a depender más de la disponibilidad de N inicial del suelo.

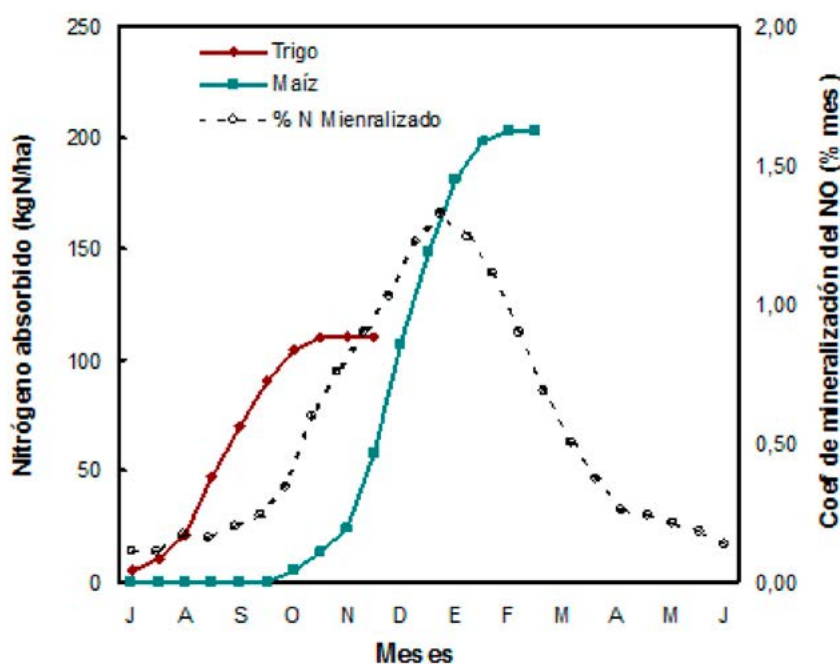


Figura 3. Curvas de nitrógeno absorbido por los cultivos de trigo y maíz y coeficiente de mineralización del nitrógeno orgánico (NO) a lo largo del año para la Pampa Ondulada (Álvarez *et al.*, 2000).

Los análisis de suelo y su interpretación se pueden realizar a la siembra o trasplante de los cultivos. Con ellos puede estimarse la disponibilidad de N (nitratos) y el contenido de nitrógeno orgánico para realizar una estimación de mineralización. En los planteos de producción orgánica, se tiende a aumentar el nitrógeno orgánico y a manejar la mineralización del mismo para asegurar su provisión para el cultivo.

Por otro lado, las leguminosas pueden ser sembradas en sistemas como los frutícolas como cultivos intercalados. Esta puede ser una muy buena estrategia dentro de sistemas que son perennes y que pueden responder a la liberación y al aporte de N en el mediano plazo.

Fósforo

La principal diferencia del ciclo de fósforo (P) respecto al de N, es que en éste no se fija desde la atmósfera. A su vez, tiene escasa movilidad en el suelo siendo su ciclo más cerrado, es decir, con menores vías de pérdida. Las plantas se abastecen de P desde el compartimento inorgánico más soluble mediante mecanismos de difusión, cuyo movimiento es lento y está determinado por la diferencia de concentración. Por lo que resulta fundamental el desarrollo radical alcanzado por los cultivos para tener un mayor abastecimiento de P.

Las vías de ingreso de P al sistema son: a) aplicación de compost u otro tipo de abono orgánico; b) fertilizantes minerales naturales (Heckman *et al.*, 2009). Generalmente, la apli-

cación de compost está relacionada con las necesidades de N para el cultivo. Sin embargo, estos materiales contienen P, y su aplicación repetida con las dosis necesarias para satisfacer los requerimientos de N del cultivo, genera un sobreabastecimiento de P, pudiendo originar problemas ambientales. Por otro lado, ésta situación puede conducir a que la fertilización en función de los requerimientos de N traiga consigo el desbalance de P (Nelson y Janke, 2007). La relación N:P en la biomasa del cultivo generalmente se encuentra entre 12:1 a 7:1, pero la relación N:P de los abonos es generalmente menor a 4:1. Esta relación resultaría aún menor luego de compostados los abonos debido a que el P se conserva más, mientras que el N es más proclive a las pérdidas. La solución para este desbalance de la relación N:P es aumentar la cantidad de N suplementado, pero sin P como elemento acompañante, por ejemplo mediante la inclusión de leguminosas (N incorporado por fijación biológica). Para verlo en un ejemplo, con la aplicación de 5.6 t/ha de cama de ave (ver en el apartado anterior de nitrógeno), se están aplicando en promedio 61.6 kg P/ha. Si la exportación de P de un maíz de 8 t/ha es de 24 kg/ha, entonces la cantidad ingresada de P a través del compost podría alcanzar para casi 3 campañas de maíz.

Otra forma de compensar el P exportado es mediante la incorporación de P mineral natural como la roca fosfórica. En general, la roca fosfórica es utilizada para el mantenimiento o incremento de la fertilidad del suelo más que como fuente de P inmediatamente disponible. El P presente en la roca fosfórica requiere distintas condiciones para que pase a estar disponible. El pH del suelo es uno de los factores primarios que determinan la disolución de la apatita, principal mineral de la roca fosfórica. Cada unidad de pH que decrece está acompañado por el aumento de disolución de la roca en 100 veces; requiriéndose pH menores a 6.5 para que se produzca la liberación. También un menor tamaño de partícula acelera la liberación de fósforo.

La harina de hueso es otra alternativa para la fertilización con P, siendo más solubles que la roca fosfórica. El hueso comercial es un producto que es tratado a altas temperaturas eliminándose el potencial de transmitir enfermedades.

El muestreo de P del suelo se realiza, en general, hasta los 20 cm de profundidad debido a su baja movilidad. Para saber si el suelo contiene un adecuado nivel de P extractable, el valor obtenido en laboratorio es comparado con un valor umbral, el cual determina el estado de suficiencia del nutriente. Si el valor arrojado por el laboratorio se encuentra en el umbral o por encima del mismo, se propone un manejo de reposición de P. Es decir, se reponen mediante la aplicación de roca fosfórica o abono orgánico lo que exporta el cultivo en la cosecha. En el caso que el valor se encuentre debajo del umbral se sugiere que además de la dosis de reposición se incluya un adicional de P para enriquecer el suelo. En general, para suelos de la Región Pampeana se propone una dosis de enriquecimiento de 4-5 kg de P por cada de ppm que se desea aumentar el P Bray (al momento de la siembra del cultivo).

A continuación se detalla un ejemplo del criterio de reposición y enriquecimiento:

Si se desea realizar maíz, en un suelo que tiene 20 ppm de P extractable –según curvas de la región este nivel es suficiente–, entonces se puede plantear la estrategia de reposición de P, es decir, aplicar lo que se extrae por cosecha. La exportación del nutriente por el cultivo se estima a partir de un rendimiento esperado del cultivo de maíz, que en este caso asumimos es de 6 t/ha, y la exportación es de 3 kg P/t grano. La reposición debería ser aproximadamente de 18 kg P/ha. La dosis de roca fosfórica (grado promedio: 0-13-0) para compensar la exportación de P sería de aproximadamente 138 kg/ha. En el caso de contar con un compost de gallinaza como fuente de P, que puede presentar una alta concentración de P (20 kg P/t producto) (Menoyo, 1995) la dosis a aplicar para compensar las salidas por cosecha sería de aproximadamente 1 t/ha de compost.

Si en el suelo en el que se quería realizar el maíz, en lugar de las 20 ppm de P contaba con 12 ppm de P, entonces el criterio de fertilización podría ser la reposición y el enriquecimiento. Para el enriquecimiento se tendría que agregar un plus de fertilizante con el objetivo de ir incrementando paulatinamente el valor de P extractable hasta llegar al umbral de 20 ppm.

Potasio

El potasio (K) es absorbido por los cultivos en grandes cantidades, en magnitud similar a la del N. Los suelos de la región pampeana cuentan con importantes reservas de K en los minerales primarios y secundarios. A su vez, poseen altos valores de K disponible (solución + intercambiable). Los suelos ácidos de la región subtropical de nuestro país son deficientes en K, no sólo porque se ha perdido por lixiviación, consecuencia de un balance hídrico positivo, sino que además las arcillas predominantes son caolinitas con baja capacidad de intercambio catiónico.

Los abonos son una buena fuente de K rápidamente disponible cuando son aplicados al suelo. El 90% del K de un abono está disponible para los cultivos en el primer año de aplicación. Debido a la alta solubilidad del K, es importante el manejo del compost y los abonos para minimizar las potenciales pérdidas durante el proceso de compostado, o antes de su aplicación.

Los abonos o residuos con alto contenido de K, pueden conducir a niveles excesivos de K intercambiable, e interferir con la absorción de Mg y Ca para los cultivos, y a su vez este desbalance en forrajes conduce a deficiencia de estos minerales en el ganado que los consume.

Las salidas de K del sistema involucran la exportación, el escurrimiento y la lixiviación. Las pérdidas por escurrimiento pueden ser controladas manteniendo el suelo cubierto y utilizando buenas prácticas culturales que prevengan la erosión. En suelos arenosos hay mayor susceptibilidad a la lixiviación de K.

Las hojas, los tallos y los frutos turgentes, son los órganos que presentan mayor concentración de K, comparado con semillas y granos. Por lo tanto, cosechas que remuevan plantas enteras, como el forraje o heno, remueven una considerable cantidad de K del suelo.

Los fertilizantes minerales naturales (e.g. Sulfato de potasio y magnesio) pueden ser también usados para suplementar con K aunque su solubilidad sea menor. La pauta de manejo de este nutriente es similar a la del P, a través de la reposición, o la reposición y enriquecimiento.

Un ejemplo del criterio de reposición podría ser: suponiendo un rendimiento esperado para el cultivo de trigo de 3 t/ha, siendo la exportación de 4 kg K/t de grano, se deben aplicar 12 kg K/ha para compensar la exportación por cosecha. La dosis de compost vacuno con un promedio de 12 kg K/t de producto (Moreno Casco y Moral Herrero, 2008) que se debe aplicar es alrededor de 1 t/ha.

Por otro lado, para el caso del cultivo de tomate, si bien el rendimiento es muy variable debido a que depende de la tecnología utilizada, si suponemos un rendimiento de 30 t/ha, la exportación es de 1.16 kg K/t, esto representa 35 kg K/ha que se exportan con la cosecha de tomate. Con el objetivo de reposición, cantidad que se debe aplicar de compost vacuno al suelo es alta, y está en el orden de las 3 t/ha, aproximadamente.

Azufre

Los ciclos del N y del S presentan varios aspectos en común. Tanto el S como el N se encuentran como componentes de la materia orgánica, y como gases en la atmósfera.

En las regiones húmedas, el 90% del S se encuentra en el componente orgánico. La relación C:N:S de la materia orgánica es cercana a 100:8:1. Del mismo modo que con el N, la actividad microbiana tiene influencia sobre la disponibilidad del S, liberando sulfato a partir de la mineralización del S orgánico, o tornándolas no disponibles por la inmovilización. Esto último ocurre cuando se adicionan fuentes carbonadas y el material es pobre en S. Los factores ambientales que determinan tanto, la mineralización como la inmovilización, son la temperatura, humedad, aireación y pH. Esto determina que muchas de las prácticas de manejo influyen sobre la disponibilidad de N y de S.

La atmósfera contiene gases de S que pueden ser depositados sobre las plantas y ser absorbidos por las mismas. La concentración de gases de S es diferente en las distintas regiones, destacando que en zonas altamente industrializadas se libera a la atmósfera SO_2 , y por ello hay mayor concentración.

Las plantas absorben el S principalmente en forma de sulfatos. El sulfato es un anión soluble y muy susceptible a la pérdida por lixiviación. Los suelos arenosos en regiones húmedas son especialmente propensos a la pérdida de S por lixiviación. Una estrategia para absorber el S lixiviado es incluir en la rotación cultivos que presenten raíces profundas y exploren horizontes subsuperficiales. Estos cultivos, cuando son incorporados al suelo, retornan el S lixiviado a la superficie. Los cultivos de cobertura no sólo aumentan el potencial de captura de S atmosférico en el follaje, sino que pueden absorber y prevenir la lixiviación de sulfatos.

El compost y los abonos son una fuente adecuada para abastecer los requerimientos de S de la mayoría de los cultivos. La aplicación de fertilizantes potásicos, como el sulfato de potasio, son excelentes fuentes inorgánicas de disponibilidad inmediata de sulfatos. El yeso es otra de las fuentes de S ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), que contiene no sólo 18% de S, sino que aporta también 23% de Ca. El S elemental, es ampliamente usado como fungicida, pero también es una fuente potencial de S para la nutrición de la planta. El S elemental no se encuentra inmediatamente disponible para los cultivos. Se requiere temperatura y humedad adecuadas para que se produzca la oxidación microbiana del S elemental pasando a formas disponibles para las plantas. Tanto el yeso como el S elemental se pueden utilizar para la corrección de pH y/o sodicidad.

Calcio y Magnesio

En general, los Molisoles presentan una saturación con calcio (Ca) alrededor de 60-70% de la capacidad de intercambio catiónico. La planta absorbe el Ca desde la solución del suelo (flujo masal) y del complejo de intercambio (intercepción). En zonas húmedas, la roca calcárea es la principal fuente de Ca para ser aplicado al suelo. A su vez, en suelos ácidos la aplicación de roca calcárea puede ser una práctica regular para neutralizar la acidez. En suelos sódicos, se aplica yeso (23% Ca) para desplazar el Na del complejo de intercambio.

Es importante considerar el balance que presenta con otros cationes, como el K y el Mg, los cuales compiten con el Ca en la absorción, y pueden generar desbalances nutricionales en las plantas. El Ca es un nutriente que tiene una importancia relevante en los tejidos de los frutos, contribuyendo a la firmeza de las paredes celulares. En estos casos se puede aplicar sales de calcio pulverizando.

En relación al magnesio (Mg), suelos arenosos y ácidos son más susceptibles a deficiencias de Mg que los arcillosos. El Mg intercambiable es la principal fuente de Mg disponible. Un nivel de 10% de Mg intercambiable implica una buena provisión de este nutriente para los cultivos.

La mayoría de los cationes, en particular el K, son antagónicos al Mg. Evitar excesivas aplicaciones de K y usar dolomita son prácticas claves para mejorar la nutrición de Mg. Además de la dolomita, los abonos orgánicos son una fuente de Mg.

Existe un porcentaje óptimo de saturación en el complejo de intercambio el cual consiste de 65% de Ca, 10% de Mg y 5% K. Estas saturaciones asegurarían una adecuada relación de los cationes.

Micronutrientes

En general, el uso de materiales orgánicos ayuda a corregir o prevenir las deficiencias de micronutrientes. La exportación de micronutrientes por los cultivos en general son bajas comparadas con las cantidades aportadas mediante aplicaciones típicas de abonos o estiércol.

La suplementación con minerales (Cu y Zn) a los animales dentro del establecimiento, incorporan al suelo estos elementos a través del estiércol. Otra fuente de micronutrientes son los materiales inorgánicos, por ejemplo la roca fosfórica y cal, que pueden poseer impurezas en cantidades trazas de micronutrientes.

La adición de abonos orgánicos puede mejorar la disponibilidad de micronutrientes. La presencia de ácidos orgánicos solubles como producto de la actividad microbiana generan uniones denominados quelatos en la solución del suelo que incrementa la biodisponibilidad de los micronutrientes, especialmente Fe, Cu, Mn y Zn, que en el suelo reaccionan para formar componentes no disponibles para las plantas.

El pH del suelo determina la disponibilidad de la mayoría de los micronutrientes, por lo tanto, es importante considerar los cambios de pH asociados a las prácticas de manejo (Figura 4). Cuando el pH del suelo aumenta, la disponibilidad de Fe, Mn, Zn, Cu y B disminuyen. Por lo tanto, la aplicación de cal debería ser prudente para no magnificar las deficiencias de micronutrientes. La disponibilidad de Mo aumenta con los incrementos de pH. Una aplicación de cal es a menudo un corrector de la deficiencia de Mo.

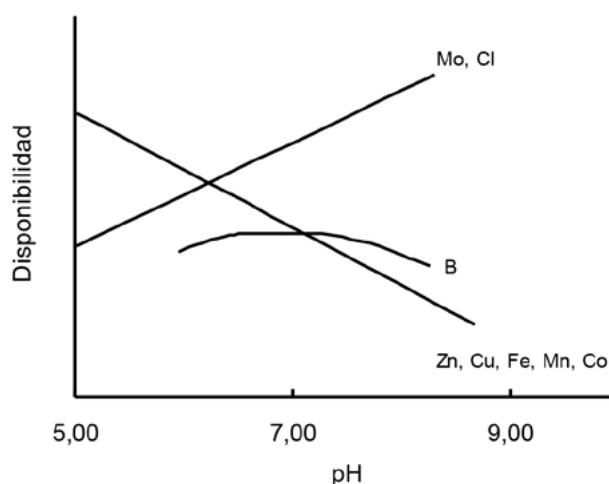


Figura 4. Efecto del pH en la biodisponibilidad de micronutrientes (Adaptado de Malavolta *et al.*, 1997).

Máquinas para la aplicación de fertilizantes y abonos

Las máquinas difieren según la forma física de los fertilizantes y enmiendas. La forma más común de aplicar fertilizantes minerales naturales es, en forma anticipada a la siembra, al voleo. A continuación se presenta una máquina fertilizadora a voleo con dos discos aleteados (Figura 5) y otra pendular o de brazo oscilante (Figura 6). Para lograr una adecuada uniformidad de aplicación se deben realizar un grado de superposición de las pasadas. Luego el fertilizante queda en superficie o es incorporado con una labor.



Figura 5. Aplicadora de fertilizantes y enmiendas bidisco.



Figura 6. Fertilizadora al voleo de bazo oscilante.

Para la aplicación de abonos orgánicos con máquina se utilizan estercoladoras que lo distribuyen a voleo. Estas máquinas cuentan con un sistema de alimentación y otro de distribución. El sistema de alimentación son cadenas unidas por listones transversales. En relación al sistema de distribución es el responsable de la disposición del material sobre el terreno. Los mismos constan de cilindros fresadores verticales u horizontales. Las aplicaciones en huertas de menor escala se realizan en forma manual.

Conclusión

En conclusión, el manejo de la fertilidad en planteos orgánicos se facilita en las producciones de menor escala o intensivas como las huertas. En ellas, la aplicación de compost resulta viable y práctica. El compost o abono orgánico, junto con la fijación biológica de N, permiten en estos sistemas un manejo ajustado y apropiado de la fertilidad.

En el caso de las producciones extensivas la aplicación de grandes cantidades de abonos orgánicos no siempre es factible. En estos casos, el manejo de la fertilidad es más fácil en producciones mixtas (agricultura y ganadería) que poseen ciclos más cerrados, con menor exportación. En los sistemas extensivos, la entrada de N debe asegurarse por vía de la fijación biológica. Ello conduce a destinar tiempos en la rotación para cumplir con este objetivo en detrimento de la producción de productos comerciales o de consumo. En el caso del resto de los nutrientes, se deberían aplicar productos minerales naturales siendo difícil lograr la reposición integral de todos los nutrientes.

Bibliografía

- ÁLVAREZ R, CR ÁLVAREZ, HS STEINBACH. 2000. Fertilización de trigo y maíz. Editorial Hemisferio Sur. 96 p.
- ÁLVAREZ R, CR ÁLVAREZ, A SARQUIS. 2008. Residues decomposition and fate of nitrogen-15 in a wheat crop under different previous crops and tillage systems. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 39: 574-586.
- ÁLVAREZ R, HS STEINBACH. 2010. Capítulo 6. Ciclado de nitrógeno en agrosistemas. En: *Fertilidad de Suelos: Caracterización y manejo en la región pampeana*. Álvarez *et al.* (Eds): 231-270.
- ÁLVAREZ R, HS STEINBACH, CR ÁLVAREZ. 2015. Manejo de la Fertilidad en producción orgánica. En: *Fertilidad de suelos y fertilización en la región pampeana*. Editorial Facultad de Agronomía, UBA. 471-485.
- BONO A, R ÁLVAREZ. 2012. Nitrogen mineralization in a coarse soil of the Semiarid Pampas of Argentina under contrasting tillage systems. *Archives of Agr. and Soil Science.* 72: 1140-1149.
- MORENO CASCO J, R MORAL HERRERO. 2008. Compostaje. Editorial: Mundiprensa. 570 p.
- COLLINO DJ, F SALVAGIOTTI, A PERTICARI, C PICCINETTI, G OVANDO, S URQUIAGA, RW RACCA. 2015. Biological nitrogen fixation in soybean in Argentina: relationships with crop, soil, and meteorological factors. *Plant Soil.* 392: 239-252.
- CREUS CJ, GA STUDDERT, HE ECHEVERRIA, SR SANCHEZ. 1998. Descomposición de residuos de cosecha de maíz y dinámica del nitrógeno en el suelo. *Ciencia del Suelo.* 16: 51-57.
- HECKMAN JR, R WEIL, F MAGDOFF. 2009. Chapter 7. Practical steps to soil fertility for organic agriculture. En: *Organic Farming: the ecological system*. CHARLES FRANCIS (Ed.), Agronomy monograph 54, ASA, CSSA, SSSA. Madison, WI. Pág: 139-172.
- MALAVOLTA E, GC VITTI, SA de OLIVEIRA. 1997. Avaliação do nutricional das plantas: princípios e aplicações. Ed. Potafos, Piracicaba, Brasil. 319 pág.
- MENOYO A. 1995. Valorización agronómica de la gallinaza. Compostaje. Tesis Doctoral. Servicio publicaciones Universidad del País Vasco, Vitoria, España.
- NELSON NO, RR JANKE. 2007. Phosphorus sources and Management in organic production systems. *HortTechnology* 17: 422-454.
- RACCA R, D POLLINO, J DARDANELLI, D BASIGALUP, N GONZALEZ, E BREZONI, N HEIN, M BALZARINI. 2001. Contribución de la fijación biológica de nitrógeno a la nutrición nitrogenada de la alfalfa en la Región Pampeana. Ed. INTA. 56 pág.

ISBN 978-987-3738-08-1



9 789873 738081