



SOMOS NUESTRO SUELO

Manual educativo para comprender
las funciones del suelo y su relevancia
en la producción de alimentos





SOMOS NUESTRO SUELO

Manual educativo para comprender
las funciones del suelo y su relevancia
en la producción de alimentos



© 2024 Fertilizar Asociación Civil

Textos: Florencia Guerrero y Esteban Ciarlo

Edición: Alejandra Groba

Diseño: Daniela Rombolá

Impresión Latingráfica

El manual *Somos nuestro suelo* fue desarrollado por Fertilizar AC para promover el conocimiento sobre el suelo y su relevancia en la producción de alimentos, como un material que puede ser útil para alumnos, técnicos y productores agropecuarios. Para reproducir todo o parte del contenido en cualquier soporte se deberá solicitar permiso previo a info@fertilizar.org.ar. Se prohíbe usar comercialmente el contenido sin autorización.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS.

Impreso en Buenos Aires, Argentina

ISBN: 978-987-47016-3-3

Tirada de la 1° edición: 1.000 ejemplares

Fertilizar Asociación Civil

Bartolomé Mitre 1332, piso 4 C1033AAZ CABA, Argentina

www.fertilizar.org.ar

Fertilizar Asociación Civil

Somos nuestro suelo; Compilación de Florencia Guerrero; Esteban Ciarlo; Editado por Alejandra Groba.-1° ed.- Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Fertilizar Asociación Civil, 2025. 88p.; 21 x 30 cm.

ISBN 978-987-47016-3-3

1. Fertilidad del Suelo. I. Guerrero, Florencia, comp. II. Ciarlo, Esteban, comp. III. Groba, Alejandra, ed.

CDD 338.14

Fertilizar AC agradece la colaboración y el apoyo de las empresas socias y, en especial, a los integrantes del Comité de Comunicación.

>. Prólogo

Los seres humanos primitivos dependían de los alimentos que se produjeran naturalmente en su región. Esto dio lugar a un tipo de organización basada en la caza, la pesca y la recolección, que los convertía en nómades.

Hace unos 10.000 años, los humanos comenzaron a domesticar los primeros animales, y hace 8.000 años, las plantas. Esto provocó un cambio de eje enorme: las personas dejaron de confiarle a la naturaleza la provisión de alimentos, y comenzaron a producirlos por sí mismas.

Las poblaciones que dominaban la agricultura abandonaron el nomadismo y construyeron los primeros asentamientos. La cantidad de humanos creció exponencialmente. En los sitios donde la agricultura se desarrollaba con más éxito, se generaron, por primera vez en la historia de la humanidad, alimentos excedentes, lo que permitió también destinar tiempo a tareas que no fueran la mera supervivencia.

En un principio, cada familia o pequeña comunidad producía alimentos para autosustentarse. Las cocinas de las aldeas eran

verdaderas factorías, no existían los productos terminados; se carneaban los animales y se convertía la leche en queso. La vida de todas las comunidades estaba fuertemente ligada a las estaciones climáticas y a los ciclos de siembra y cosecha.

Más tarde, con la intensificación del comercio y el crecimiento de las ciudades, la producción primaria de alimentos se fue alejando de la mayor parte de quienes los consumían, tanto por la distancia física como por el grado de procesamiento. Con la división del trabajo y el comercio, pasó a haber unos pocos trabajadores cada vez más especializados en producción de alimentos primarios, ubicados en el campo, y muchos consumidores, en su gran mayoría urbanos, receptores del fruto de esas tareas, unos productos en ocasiones tan transformados que es imposible reconocer las materias primas.

El chico que merienda galletitas con leche chocolatada se encuentra a una enorme distancia física y de conocimientos de las vacas que produjeron esa leche, de las plantaciones de cacao y de trigo, y de las fábricas que procesaron esos ingredientes.





Por su parte, la producción agrícola también ha evolucionado muchísimo. La primera agricultura, basada en el arado con tracción a sangre, fue extendiendo su productividad gracias a la mecanización agrícola. La Revolución verde incorporó genética e insumos y logró aumentar en forma exponencial la producción de granos, lo que permitió sostener el aumento de población mundial. Por desconocimiento, este tipo de producción tradicional tuvo un importante impacto ambiental, especialmente debido al deterioro del suelo por erosión.

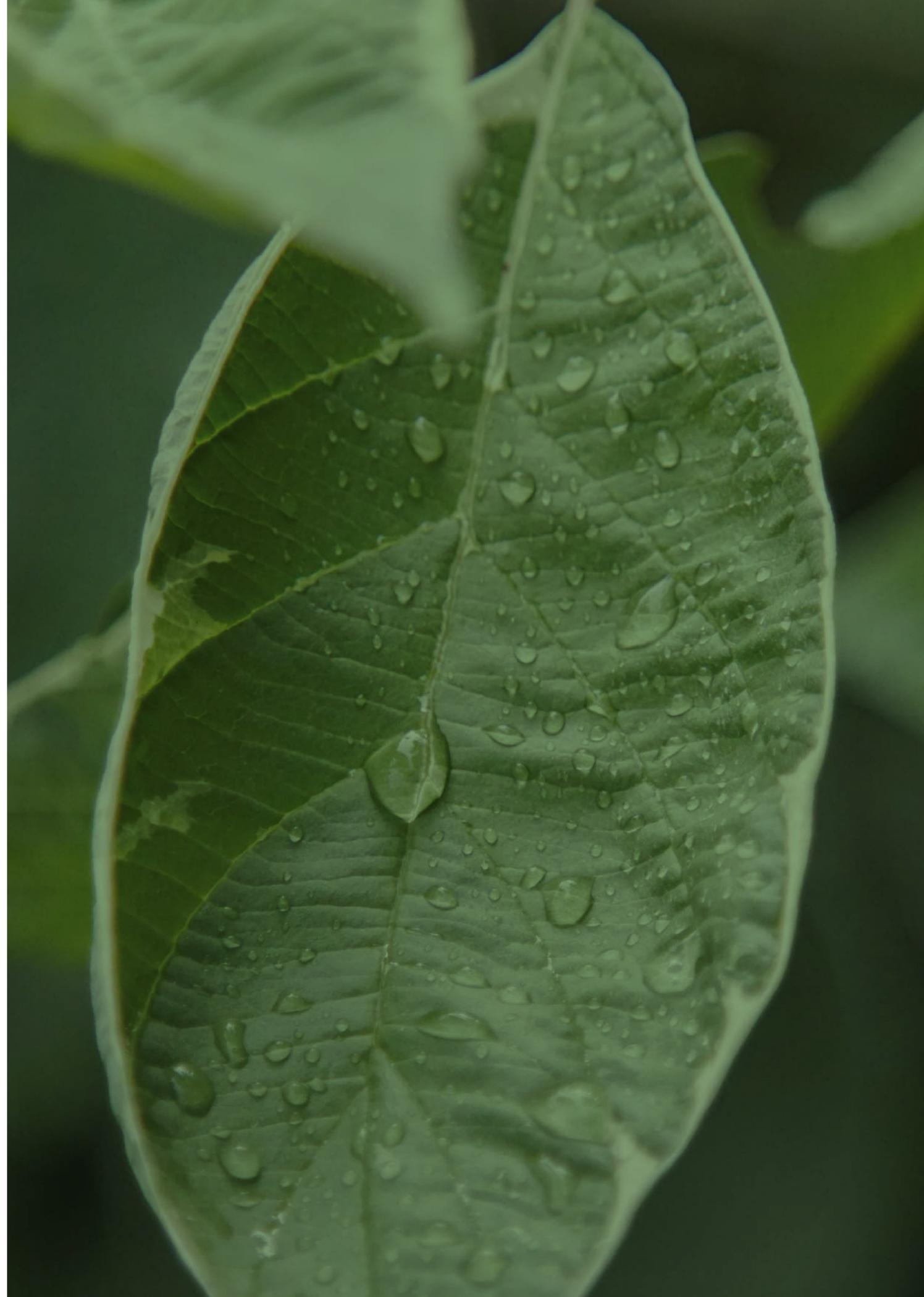
No obstante, en los últimos 30 años, se han logrado niveles de producción nunca vistos, y con los mejores estándares de sustentabilidad que se hayan tenido. La siembra directa, que reemplazó el arado; el desarrollo de productos de menor impacto ambiental y de formas de aplicación que lo atenúan, han generado la posibilidad de abastecer de comida a miles de millones de habitantes del mundo cuidando la sostenibilidad del sistema.

En este manual intentamos poner un poco de luz sobre algunos aspectos de los actuales procesos productivos del agro, en la convicción de que conocer ayuda a valorar. Se

trata de un esfuerzo por llevar a un lenguaje llano los fundamentos de la producción agropecuaria, especialmente en aquellos puntos más cercanos al área de trabajo de Fertilizar, con foco en la importancia del suelo, el rol de los nutrientes minerales en la producción vegetal y el uso racional de los recursos naturales, que nos ayudan a lograr una producción de alimentos (y de energía) sustentables.

Esperamos que este libro sea un material de consulta, que ayude a que esos dos mundos, el de la producción de alimentos y el del consumo, se conecten.

Ing. Agr. Jorge Bassi
Vicepresidente de Fertilizar AC



>. Índice



→ Motivación	9
→ Introducción	11
• Planeta Tierra	11
• ¿Es lo mismo tierra y suelo?	12
→ El suelo	14
• Definición	14
• Funciones	16
→ ¿Cómo se forman los suelos?	18
• Procesos formadores	19
• Factores formadores	20
• ¿Cómo se ve el desarrollo de un suelo?	23
Horizontes	24
→ ¿Cómo son los suelos? Propiedades	26
• Características externas	27
Relieve	27
Vegetación	27
• Características internas	29
Profundidad	29
Textura	29
Estructura	30
Capacidad de intercambio catiónico	31
Acidez/alcalinidad (pH)	32
Materia orgánica (MO)	33
→ El suelo, fuente de nutrientes	34
• Disponibilidad, excesos y déficits	35
• Transpiración	37
• Fuentes de nutrientes	38
• Macronutrientes	39
Nitrógeno	40
Fósforo	45
Potasio	47

• Nutrientes secundarios	49
Calcio	49
Magnesio	49
Azufre	50
• Micronutrientes	51
• Suelo, nutrición y alimentos	52
→ Conservación de los suelos y el ambiente	55
• Pérdida de materia orgánica	55
• Pérdida de fertilidad física	56
• Pérdida de nutrientes	58
• Prevención de daño ecológico	61
Producir eficientemente para cuidar el ambiente	
• Ciclo del carbono y de la materia	62
Fotosíntesis	63
Fijación de carbono y cambio global	64
→ Buenas prácticas de fertilización	66
• Administración responsable de nutrientes: los 4 principios	67
• Consideraciones sobre la fertilización con distintos nutrientes	70
Fertilizantes nitrogenados	70
Fertilización fosfatada	73
Fertilización con azufre	74
Fertilización con bases: potasio y calcio	74
Fertilización con micronutrientes	75
Fertilización balanceada	75
• Producción sostenible y fertilización	77
Contaminación de aguas subterráneas con nitratos	78
Emisiones de óxidos de nitrógeno a la atmósfera	79
Acumulación de fosfatos en lagunas y ríos	79
→ Consideraciones finales	80
→ Anexo: Tipos de suelos en la Argentina	82
→ Índice de figuras	84
→ Glosario	86
→ Bibliografía	88



>. Motivación



En general, cuando se habla de futuro o de esperanza, se asocia con mirar hacia adelante o hacia el cielo. Quienes escribimos este manual -profesionales de las ciencias agrarias y actividades vinculadas al sector agropecuario- pensamos que el futuro y la esperanza no están a lo lejos ni arriba, sino abajo: en el suelo, este recurso escaso y no renovable fundamental para que exista la vida.

El suelo es nuestro sustento: en sentido literal, porque nos sostiene, y en sentido amplio, porque de él dependen todas nuestras fuentes de alimento. Te invitamos a bajar la mirada, a agacharte y tomar el suelo con las manos, a poner todos los sentidos, el corazón y la razón en acción para conocer, admirar y cuidar el suelo, gracias al que existimos y del que depende nuestro futuro.



La población mundial crece de manera sostenida, y cada vez requiere mayor cantidad de alimentos de una superficie terrestre limitada.



>. Introducción

Planeta Tierra

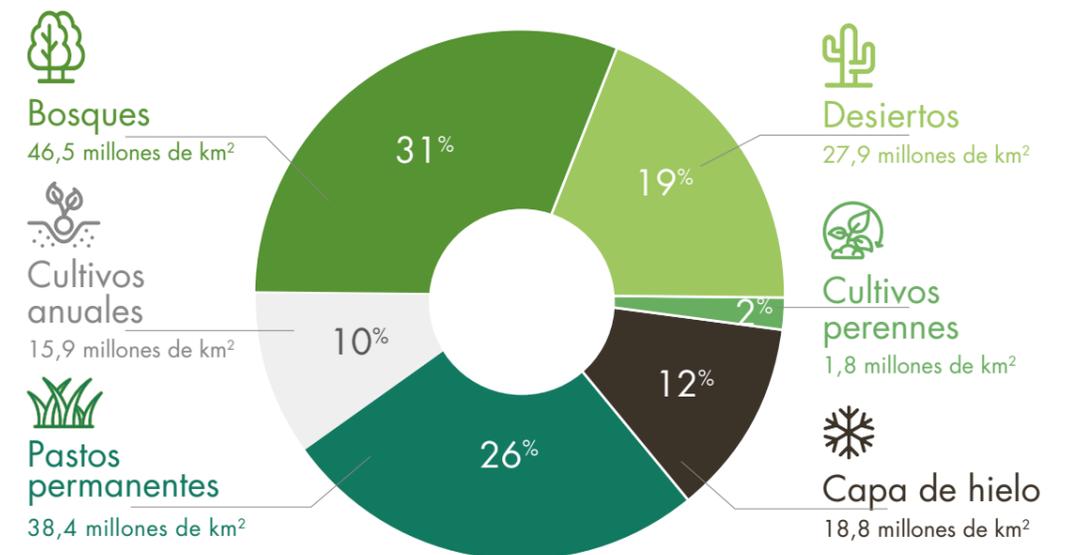
A pesar de que a nuestro planeta se lo denominó Tierra, tan solo el 30% de su superficie es tierra firme; el resto es agua. Como muestra la Figura 1, de esa pequeña superficie terrestre, casi una tercera parte son desiertos o glaciares, y el resto está ocupado por cultivos anuales o perennes (12%), pasturas y pastizales para la cría de ganado (26%) y ecosistemas forestales (31%), además de las zonas urbanas (aproximadamente 1%). Todos necesitamos del suelo: las plantas, los animales salvajes y domésticos, y las personas.

La población mundial crece de manera sostenida. Según la Organización de Naciones Unidas (ONU), se espera que alcance 8.500 millones de personas para 2030, cuando en

1950 se estimaba que habría 2.500 millones. Esto implica que cada vez se requieren mayores cantidades de alimentos de esta superficie terrestre limitada. Así, se genera una competencia: el crecimiento de una ciudad le quita tierras a la flora y fauna nativa o a la producción agropecuaria; cuando una zona se destina a la preservación de la naturaleza, se achica el área potencial de producción de alimentos o de crecimiento urbano; cuando se aumenta el área cultivada, se altera el paisaje natural, y así sucesivamente. Esto genera cuestionamientos legítimos. ¿Cuál es la situación de equilibrio más deseable? Este es el desafío que estamos obligados a resolver como habitantes responsables del planeta Tierra, especialmente, desde la producción agropecuaria.



► **Figura 1.** Proporciones de los principales destinos de la superficie terrestre. Fuente: David Lindbo y colaboradores (2021).





El suelo es la porción superficial del planeta, donde crece la mayoría de las raíces de las plantas.



¿Es lo mismo tierra y suelo?

La palabra "tierra" suele designar la superficie del planeta no cubierta por mares, lagos o ríos, es decir, los continentes y las islas. Más cotidianamente y también en textos jurídicos, se utiliza para referirse a una porción de terreno concreto bajo diferentes usos. La tierra puede estar cubierta por distintos tipos de vegetación (como pastos, cultivos, humedales, etc.) así como por construcciones artificiales.

El suelo es la porción superficial del planeta, donde crecen la mayoría de las raíces de las plantas. Está formado por partículas de

roca descompuestas y pequeñas partículas minerales, y por material orgánico, como residuos de plantas y animales, y organismos como bacterias y hongos, además del aire y el agua que contienen sus poros. Las propiedades del suelo, como la textura, el color, el contenido de materia orgánica, etc., pueden variar de una zona a otra, así como en distintas capas del mismo lugar.

El suelo desempeña un papel vital en los ciclos de la naturaleza, especialmente en el ciclo del agua y los ciclos de nutrientes como el carbono, nitrógeno y el fósforo.



>. El suelo

Definición

Para poder conocer algo es necesario definirlo. Hay varias definiciones de suelo, que hacen hincapié en distintos aspectos o características. Veamos algunas:

► “El suelo es un componente fundamental del ambiente, natural y finito, constituido por minerales, aire, agua, materia orgánica, macro y microorganismos que desempeñan procesos permanentes de tipo biótico y abiótico, cumpliendo funciones vitales para la sociedad y el planeta”.²

► “Los suelos constituyen la capa superficial del terreno, están compuestos por minerales y materiales orgánicos que tienen una serie de propiedades específicas que permiten el desarrollo de la vegetación. Son el resultado del accionar de los distintos procesos formadores de los suelos (procesos pedogenéticos), controlados a su vez por los factores de formación: clima, relieve, biota, material originario y tiempo.”³

► “El suelo es una formación de origen natural que se halla en la intersección de la litosfera, hidrosfera, biosfera y atmósfera. Resulta del accionar de los elementos ambientales, esencialmente clima, biota, roca y relieve, y también de la actividad

antrópica. Posee constituyentes minerales y orgánicos en estado sólido, líquido y gaseoso, los que están interrelacionados, conformando distintos niveles de organización con variaciones espaciales (verticales y laterales), así como temporales (desde diarias, estacionales hasta centenarias y aún milenarias). Se presenta en la superficie terrestre como un continuo (pedosfera) interrumpido por otras formaciones naturales: hielo, roca, agua, o bien por áreas urbanas. Los procesos de formación de los suelos involucran cambios en los estados de la energía y la materia que se manifiestan en forma de propiedades (físicas, químicas, físico-químicas y biológicas) que, cuando son propicias, favorecen el enraizado de las plantas terrestres y el desarrollo de otras formas biológicas. Así, el suelo contiene vida en su superficie y en su seno, y en tal sentido es un sistema vivo, y a pesar de que no se reproduce ni se multiplica y que carece de genes, suele evolucionar como un conjunto.”⁴

2. Lindbo, D. y col. 2001. *Know Soil, Know Life*. Capítulo 5: Soil Classification, Soil Survey, and Interpretations of Soil.
3. <https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/3619>
4. De Petre, Antonio A.; José L. Panigatti y José A. Ferrer. 2012. *Diccionario de términos edafológicos y otras voces asociadas*. AACCS - UNER.

La **actividad humana** puede influir en los procesos de formación del suelo.

De estas definiciones es posible extraer algunas ideas muy relevantes, sintetizadas en la Figura 2:

- El suelo es finito, no es un recurso inagotable: se degrada, se pierde.
- Cumple funciones importantes en la vida de los seres humanos y de los otros organismos vivos, como la producción de alimentos, el reciclado de materiales y la regulación ambiental.
- No está formado solamente por roca molida: el agua, el aire y los organismos y microorganismos son también sus componentes.
- El accionar humano puede influir en los procesos de formación del suelo.
- Sobre todo si lo analizamos desde el punto de vista de la producción de alimentos, el suelo es fundamentalmente el que hace posible el desarrollo de la vegetación.
- Las diferencias en el paisaje se explican por diferencias en el perfil del suelo (cómo es en profundidad).
- Las propiedades físicas y químicas del suelo determinan el tipo de vegetación que podrá sostener: favorecerán o no el desarrollo de las raíces, y de los microorganismos y organismos que vivan en él.
- El suelo da vida, contiene vida y puede evolucionar.

A lo largo de este manual se profundizará en estos aspectos importantes que definen el suelo.



► **Figura 2. Características del suelo**
Fuente: elaboración propia.



Funciones



Como muestra la Figura 3, los suelos cumplen varias funciones importantísimas, algunas de las cuales muchas veces no son consideradas como tales.

Esas funciones pueden agruparse en seis categorías:

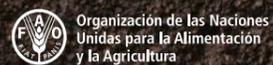
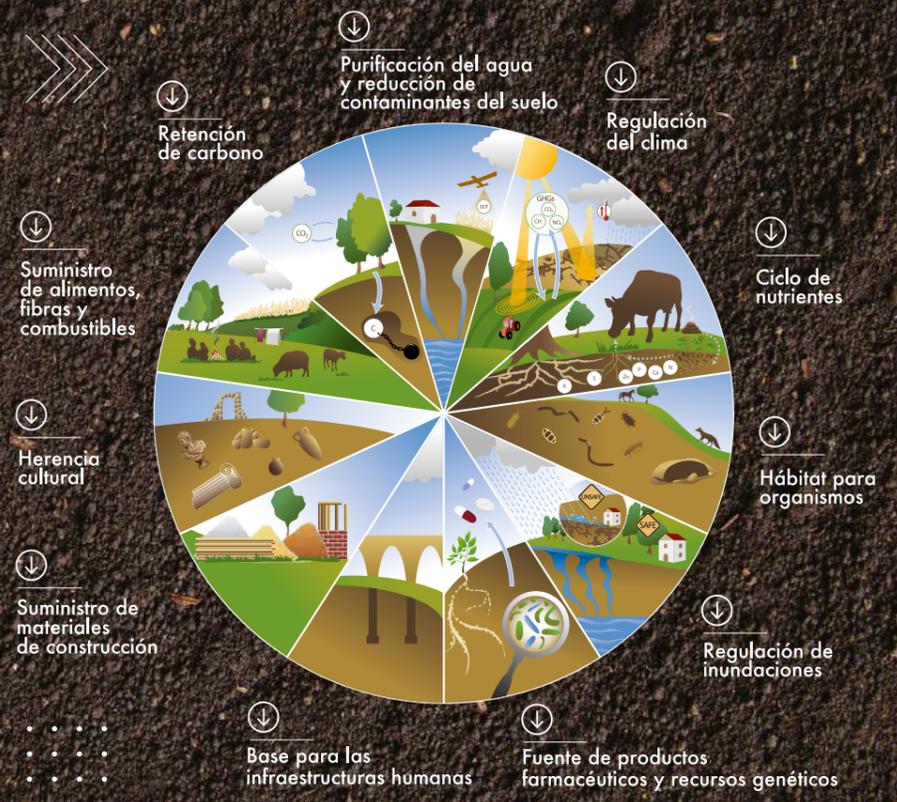
- **Reciclado de sustancias**
Ciclo de los nutrientes.
Retención de carbono.

- **Medio para el crecimiento de las plantas**
Suministro de alimentos, fibras y combustibles.
- **Regulación de otros sistemas**
Purificación del agua y reducción de la contaminación del suelo.
Regulación de inundaciones.
Regulación del clima, sobre todo, absorbiendo calor y reteniendo elementos componentes de los gases de efecto invernadero (GEI).

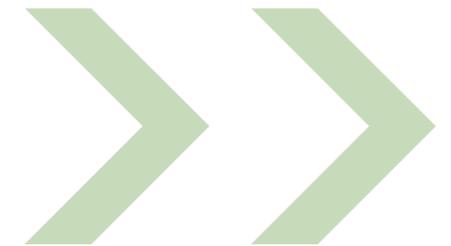
► **Figura 3. Funciones del suelo**
Fuente: FAO (2015)

Funciones del suelo

Los suelos aportan servicios ecosistémicos que permiten la vida en la tierra



El suelo bien cuidado y bien administrado puede contribuir con la **salud ambiental del planeta.**



- **Sustrato, hábitat de fauna, flora y microflora**
Hábitat para organismos.
Fuente de productos farmacéuticos y recursos genéticos (a través de los organismos y microorganismos que lo habitan).
- **Sustrato de toda actividad humana**
Base para infraestructuras humanas.
Herencia cultural (a través del estudio arqueológico).
- **Proveedor minero industrial**
Suministro de materiales de construcción.

Algunas de estas funciones son claves para resolver los temas ambientales que más nos preocupan, como el cuidado del agua, el control del calentamiento global y la necesidad de preservar los ecosistemas.

El suelo bien cuidado y bien administrado puede contribuir con la salud ambiental del planeta, pero para esto es preciso conocerlo en profundidad y tomar decisiones que lleven a potenciarlo.

>. ¿Cómo se forman los suelos?



La formación del suelo es un proceso continuo: los suelos están siempre cambiando, aunque la mayoría de las veces la velocidad de cambio es lenta y no puede percibirse fácilmente. Este proceso se denomina edafogénesis.

Para entender cómo se forman los suelos hay dos enfoques: el que se centra en los tipos de mecanismos o procesos formadores de los suelos, y el que hace foco en los factores que regulan o afectan los cambios, denominados factores formadores de suelo.

 <h2>Procesos formadores</h2>	 <h2>Factores formadores</h2>
<ul style="list-style-type: none"> → Adiciones o ganancias → Salidas o pérdidas → Translocaciones → Transformaciones 	<ul style="list-style-type: none"> → Material parental → Clima → Organismos → Relieve → Tiempo

Procesos formadores

Existen cuatro tipos de procesos formadores básicos:

- ▶ **Adiciones o ganancias:** son todo lo que se agrega al suelo desde otros sistemas. Por ejemplo, el agua de lluvia, el polvo y las partículas que trae el viento, los sedimentos que dejan los cursos de agua, el material orgánico de las plantas al morir o perder hojas y el de los animales con sus deyecciones, etc. La fertilización y el abonado también quedan incluidos en este tipo de mecanismos, ya que le incorporan al suelo nutrientes que nunca tuvo o que tenía y había perdido con las cosechas o el pastoreo.
- ▶ **Salidas o pérdidas:** son todo lo que pierde el suelo y va hacia otros sistemas. Por ejemplo, las partículas que se llevan el viento o el agua, los nutrientes que absorben los cultivos que luego se cosechan, la materia orgánica que se transforma en gases que se pierden

en la atmósfera cuando es consumida por microorganismos, la pérdida en profundidad de sustancias solubles, etc.

- ▶ **Translocaciones:** son los movimientos de sustancias o componentes o cambios de lugar que no impliquen ganancias o pérdidas para el suelo. Por ejemplo, la materia orgánica que trasladan los organismos que viven en el suelo, como las lombrices; el movimiento de las arcillas en profundidad para acumularse en capas inferiores, o el ascenso de las sales al evaporarse el agua.
- ▶ **Transformaciones:** se relacionan con reacciones químicas y cambios físicos de los componentes del suelo. Por ejemplo, la descomposición del material orgánico, la oxidación de componentes (que da por resultado un color rojizo por el hierro) o la formación de arcillas a partir de minerales originales del suelo.

Los **suelos** siempre están **formándose y cambiando**



 + Adiciones	 - Pérdidas	 ↻ Translocaciones	 ↻ Transformaciones
---	--	---	--

▶ **Figura 4.** Procesos formadores de suelos
Fuente: Soils Overview. SSSA



Factores formadores

Los factores que afectan la edafogénesis son cinco: el material original o parental, el clima, los organismos, el relieve y el tiempo.

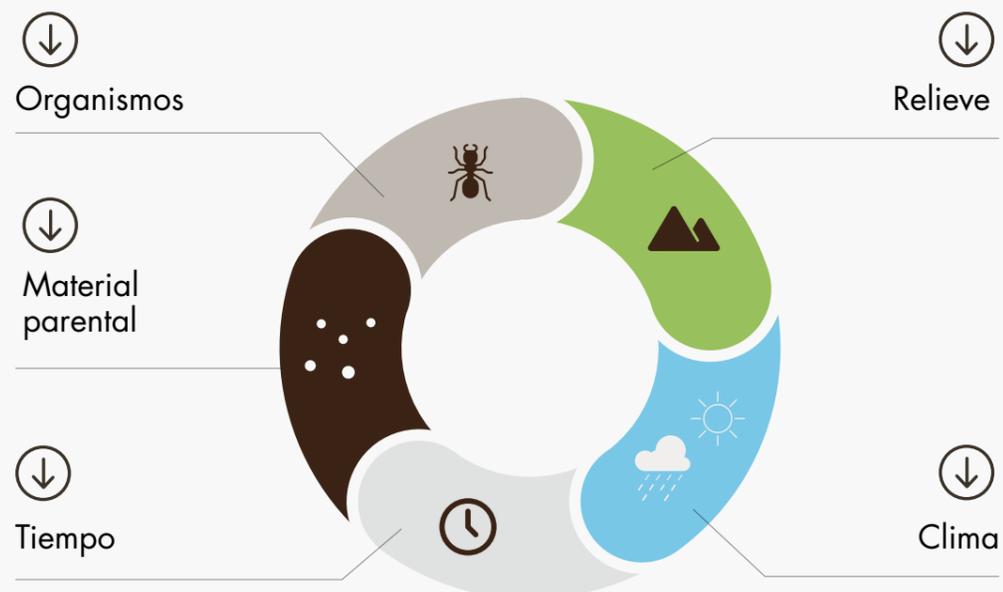
► **Material parental:** es el material original del suelo, que es transformado por los procesos formadores. De sus características dependerán especialmente la textura del suelo, es decir, el tamaño de sus partículas primarias (proporción de arcilla, limo y arena) y la composición mineral, que determinará, entre otras cosas, el tipo de arcillas formadas y la abundancia de determinados nutrientes, como el fósforo o el potasio. Este factor es más relevante en suelos jóvenes; los suelos más maduros van diferenciándose cada vez más del material original.

► **Clima:** interviene principalmente a través de cambios en la humedad y la temperatura del suelo, que influyen en todas las reacciones químicas, físicas y biológicas que se dan. Las condiciones extremas, como las heladas y los cambios bruscos de temperatura, ayudan a romper las rocas y minerales. El agua y la temperatura también inciden directamente en el desarrollo de las plantas y en la velocidad de descomposición de los restos vegetales.

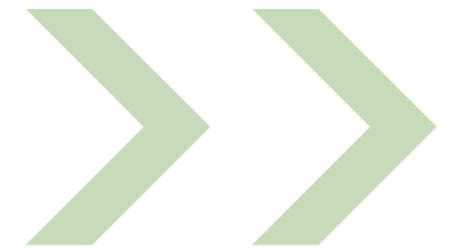
Una mención aparte merece la relevancia del agua como actor central en el desarrollo de los suelos. A través de procesos de disolución, hidratación e hidrólisis se generan cambios profundos en los minerales que forman los suelos. Asimismo, todos los procesos

► **Figura 5.**

Factores que inciden en la edafogénesis.



El **agua** tiene una relevancia crucial en el desarrollo de los suelos.



de traslocación, y muchas pérdidas y ganancias, se relacionan con el movimiento del agua, y todos los procesos biológicos están influidos por la disponibilidad y dinámica del agua. De hecho, en las zonas muy secas, los suelos muestran muy poco o nulo desarrollo.

► **Organismos:** abarca todos los organismos y microorganismos que viven en el suelo y sus interacciones con él. Ellos descomponen física y químicamente los residuos vegetales y animales (material orgánico), que transforman en dióxido de carbono y otros compuestos carbonados más estables. Las

raíces también generan efectos muy significativos en la formación del suelo, a través de sus deposiciones son precursoras de la formación de materia orgánica; a su vez, al penetrar el suelo modifican su estructura, generan galerías, rompen zonas compactadas y liberan polisacáridos, que son la fuente de energía principal de los suelos.

En este ítem puede incluirse también la influencia humana, tanto cuando favorece los procesos de pérdida de material por erosión al dejar el suelo descubierto, expuesto a los efectos del viento y la lluvia, como cuando repone nutrientes mediante la fertilización o abonado.

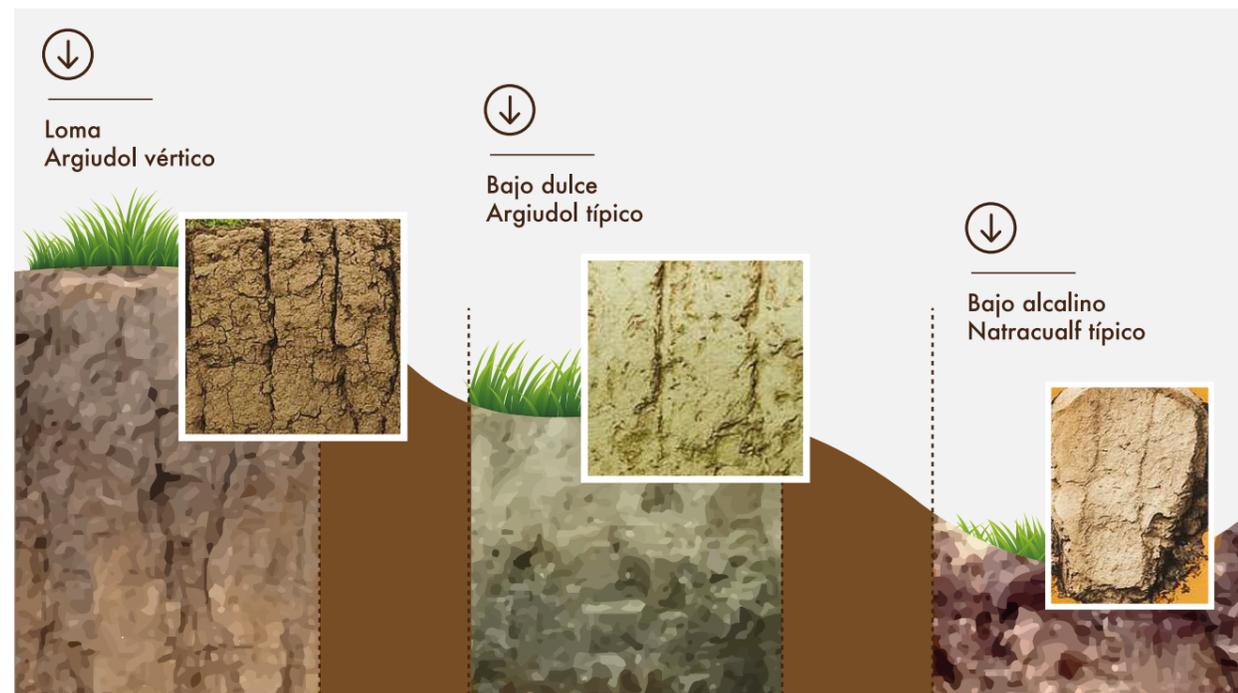


► **Relieve:** es un factor importante, porque determina en gran medida la dinámica del agua en el suelo: zonas más planas estimulan la infiltración (entrada de agua al suelo) y limitan los procesos de erosión y sedimentación de partículas. La posición en el relieve también influye en la forma en que el suelo recibe la radiación solar y cómo se calienta o enfría.

► **Tiempo:** es un factor de formación pasivo, hace referencia al período en el que tienen lugar los procesos formadores del suelo y la acción de los otros factores formadores. Cuanto más extenso haya sido el tiempo desde el comienzo del desarrollo del suelo, mayor será su evolución, aunque este desarrollo requiere ineludiblemente el paso del agua. Por esto, los suelos de desierto son siempre considerados suelos jóvenes, ya que están escasamente transformados.

En resumen, ningún factor actúa en forma independiente para formar los suelos, y los procesos dependen directamente del juego interactivo de los factores.

Así, el mismo material original dará lugar a distintos suelos dependiendo de si se encuentra, por ejemplo, en un clima seco y frío, donde hay poco desarrollo de vegetación y organismos, o en uno cálido y húmedo, donde las reacciones físico-químicas tienen lugar con intensidad. En la Figura 6 podemos ver que, en la misma zona, con el mismo clima y vegetación similar, el relieve conduce a diferentes suelos. Sin entrar en detalles técnicos, surgen a simple vista claras diferencias entre el color del suelo superficial desarrollado en la loma y los de los suelos desarrollados en los bajos.



► **Figura 6.** Secuencia de suelos en una misma zona: en loma (Argiudol vértico, suelo de partes altas) y en dos bajos (Argiudol típico, suelo de zonas intermedias, con excesos de agua, y Natracualf típico, suelo de zonas más bajas, con altos niveles de sales de sodio).

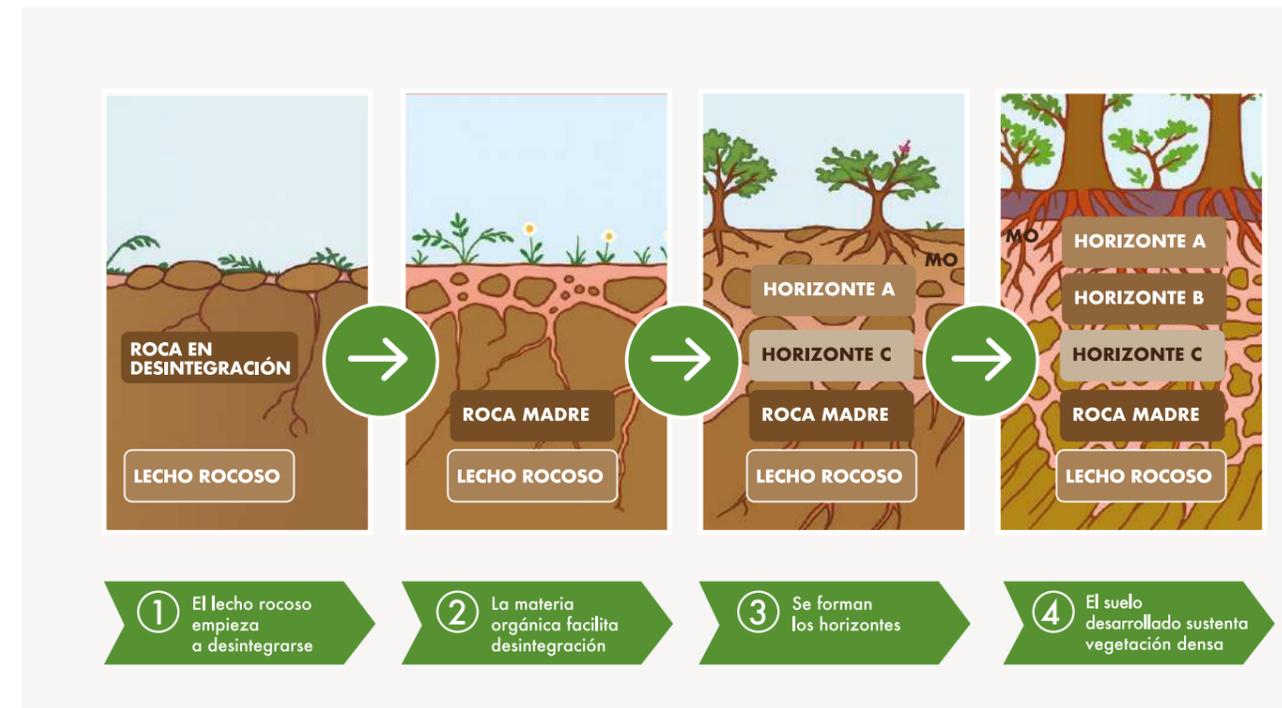
¿Cómo se ve el desarrollo de un suelo?

Como fruto de la interacción de todos los factores formadores, y como resultado de procesos de ganancia, pérdida, transformación o traslocación, en los suelos se generan distintas capas, llamadas horizontes. Se diferencian entre sí, principalmente, por su color, espesor, textura (tamaño de partículas) y estructura (forma y tamaño de los agregados o terrones que forman las partículas del suelo). Al conjunto de horizontes se lo denomina "perfil del suelo".

De acuerdo con la cantidad y profundidad

de estos horizontes, se puede inferir la edad del suelo y los procesos que lo originaron. Suelos con mayor cantidad de horizontes y más profundos se corresponden con suelos más evolucionados.

En la Figura 7 se ve cómo, a medida que los procesos y factores actúan durante más tiempo o con más intensidad, el suelo va desarrollando distintos horizontes. También se puede observar la relación entre la evolución del suelo y la vegetación que se desarrolla sobre él.



► **Figura 7.** Evolución del suelo.



Como resultado de procesos de ganancia, pérdida, transformación o traslocación, en los suelos se generan distintas capas, llamadas horizontes.



→ Horizontes

Los horizontes se denominan con letras según sus características básicas.

El horizonte C es el primero en aparecer: es la roca madre (material original) desintegrada. Luego se desarrolla el horizonte A, que es el superficial de todos los suelos: en él se empiezan a formar arcillas, lo que aumenta la retención hídrica, y se acumula material orgánico, lo que le da su típico color oscuro.

El horizonte B se forma por debajo del horizonte A, como resultado de la acumulación de arcillas, por lo que es el que generalmente más disminuye la permeabilidad interna: en el horizonte B, el agua frena su velocidad y deposita sales y arcillas que vienen desde la capa superior.

La observación de las características del perfil puede ayudar al diagnóstico del estado del suelo. Por ejemplo, se puede saber si sufrió en algún momento excesos de agua o qué tipo de vegetación lo recubría, así como predecir su productividad y cuáles son las medidas de manejo que se deben tomar para cuidarlo y mejorarlo.



Horizonte A: el hábitat de las raíces

El horizonte A es el que primero se forma cuando se desarrolla un suelo, y existe en casi todo el mundo. En él ocurren procesos muy importantes que definen la calidad productiva y ambiental de un suelo. La principal es que en esta capa es donde se acumula la mayor cantidad de un componente clave del suelo: la materia orgánica. Además de dar el típico color oscuro del suelo superficial (tierra negra), la materia orgánica es fuente de nutrientes y energía para los organismos que viven en el suelo; vuelve al suelo más resistente ante la agresión externa; regula la temperatura y aumenta la capacidad de retener agua y sustancias; y estimula la actividad biológica general, lo que facilita procesos de biodegradación de componentes orgánicos. En este estrato "confortable" es donde crecen la mayoría de las raíces de las plantas terrestres que conocemos.

>. ¿Cómo son los suelos?

Propiedades

Muchas veces se habla de buenos suelos y malos suelos, pero ¿existe realmente esta diferencia? Probablemente, no. Lo que ocurre es que los suelos son muy distintos y presentan diferentes propiedades que los hacen más o menos aptos para determinados usos. Existen ambientes muy buenos para la ganadería que no lo son tanto para la agricultura, o suelos que no son aptos para ganadería, pero que serían muy buenos para desarrollos inmobiliarios, entre otros ejemplos. Lo más importante es no forzar

una actividad para la que el suelo no tiene aptitud, ya que esto podría generar su deterioro.

Existen distintas herramientas y análisis para determinar la calidad de un suelo. Una de las primeras evaluaciones que se hace es visual: se observa el paisaje, el relieve y la vegetación.

Así pueden empezar a evaluarse distintas características del suelo, tanto externas como internas.

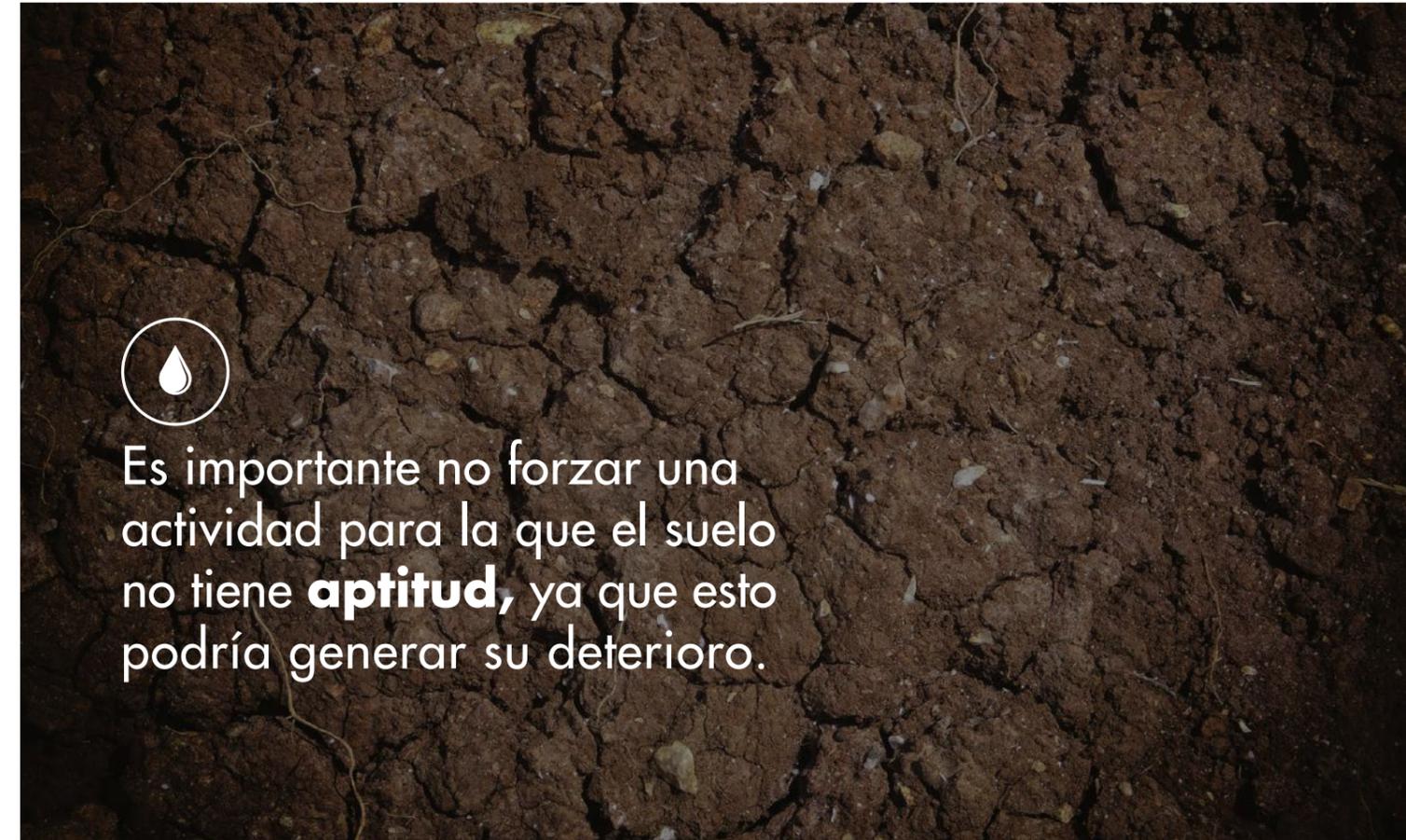
Características para determinar la calidad del suelo

Externas

- Relieve
- Vegetación

Internas

- Profundidad
- Textura
- Estructura
- Capacidad de intercambio catiónico (CIC)
- Acidez/alcalinidad (pH)
- Materia orgánica (MO)



Es importante no forzar una actividad para la que el suelo no tiene **aptitud**, ya que esto podría generar su deterioro.

Características externas

→ Relieve

El relieve del terreno es importante porque determina el comportamiento del agua en superficie y la posibilidad o imposibilidad de realizar algunas labranzas. Si el terreno es muy inclinado, el agua corre rápidamente y no penetra en el suelo (no infiltra), por lo tanto, no llega a estar disponible para las plantas. Si el terreno es muy plano, cuando llueve mucho el agua se acumula en la superficie, se encharca, y esto puede ahogar las raíces. La pendiente nos permite clasificar el terreno en sectores altos, intermedios y bajos. Estos sectores se suelen manejar de manera diferenciada, porque tienen distintos requerimientos y potencialidades.

→ Vegetación

La vegetación da muchas pistas sobre la calidad y salud del suelo. Algunas especies son indicadoras de calidad de suelo, y otras marcan limitaciones de la fertilidad. Junto con el relieve, indica dónde se puede estudiar el suelo para conocer sus características internas. Así, a partir de la observación del relieve y la vegetación, pueden definirse regiones y sitios de muestreo para hacer los análisis que permitirán explicar las diferencias que se observan.





► **Figura 8.** Calicata (en la Facultad de Agronomía de la UBA)



► **Figura 9.** Barreno y bolsas para muestras de suelo

Calicata y barreno, herramientas para hacer visible lo invisible

Para evaluar características importantes de los suelos, como la textura, el porcentaje de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico, el pH y el contenido de nutrientes, es preciso tomar muestras del suelo con una herramienta llamada barreno (del latín *vervina*, "jabalina"), que permite extraer cilindros de suelo a diferentes profundidades fijas para analizarlos en el laboratorio (Figura 9).

Otras propiedades como la estructura o la profundidad del suelo sólo pueden ser observadas haciendo un pozo profundo llamado calicata, nombre que procede de la conjunción de calar (del latín *chalar*, "penetrar", "atravesar") y catar (del latín *captare*, "tomar", "buscar"). La calicata (Figura 8) permite observar si el perfil tiene, por ejemplo, evidencias de acumulación de sodio o alguna capa endurecida de tosca (carbonatos de calcio y magnesio cementados), que serían limitantes para la producción, o si el color del horizonte superficial indica abundancia de materia orgánica y, por ende, dar una idea de la fertilidad del suelo. Es en la calicata donde pueden observarse los distintos horizontes del perfil.

Características internas

→ Profundidad

Es uno de los elementos que se tienen en cuenta para definir si un suelo es "bueno" o "malo" para la producción vegetal, ya que es el espacio vital donde puede crecer la parte subterránea de las plantas. La profundidad de un suelo está determinada por la zona en la que aparece algún impedimento para el desarrollo de las raíces, que estas no pueden atravesar; cuanto más profundos, más aptos son los suelos para el crecimiento vegetal. La profundidad también determina, junto con la textura y la cantidad de materia orgánica estabilizada, la capacidad del suelo de almacenar agua y nutrientes para que utilicen las raíces.

que se considera un gran marco para el crecimiento de las plantas.

Partículas primarias

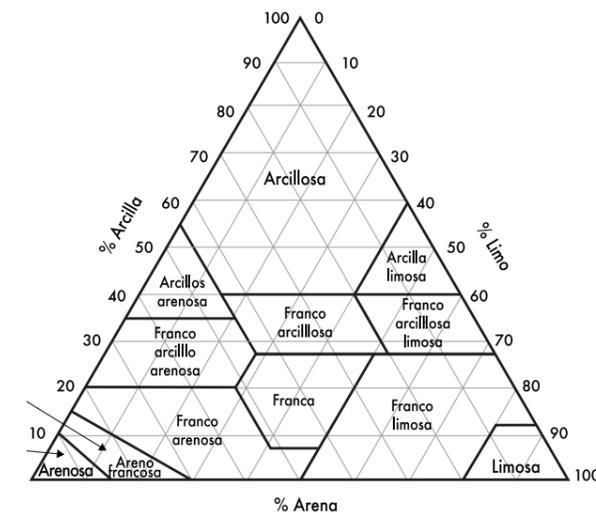
Las partículas primarias son aquellas que se obtienen luego de la ruptura mecánica de los terrones, y no pueden ser reducidas a un tamaño menor. Usualmente, se separan los tamaños en tres rangos:

- Arena (0,05-2 mm)
- Limo (0,002-0,05 mm)
- Arcilla (<0,002 mm)

→ Textura

La textura se define por los tamaños de las partículas primarias del suelo. Es una de las características del suelo que prácticamente no varían en el tiempo: las personas no pueden alterar esta propiedad fácilmente, por lo

De la combinación de estas tres características surgen las doce mayores clasificaciones de suelos, como se observa en el Figura 10.



► **Figura 10.** Triángulo de clases texturales. Fuente: Cosentino, 2019.





La textura de un suelo está definida entonces por su contenido o porcentajes de arena, limo y arcilla. Entre los suelos arenosos (con drenaje excesivo, tendientes a la aridez) y los arcillosos (con drenaje limitado y posible falta de oxígeno) se encuentra la textura franca, que combina las propiedades medias. Los suelos de textura franca contienen entre 9 y 27% de arcilla, entre 30 y 55% de arena y entre 28 y 50% de limo, y son los que tienen mayor potencial productivo.

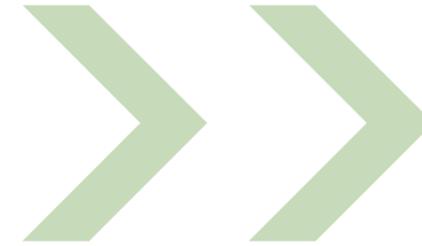
→ **Estructura**

Las partículas primarias (arenas, limos y arcillas) no se encuentran aisladas en los suelos, sino formando partículas secundarias o agregados. La estructura del suelo, es decir, la forma en que las partículas primarias se agrupan también puede observarse en la calicata. Dentro de cada horizonte podemos encontrar distintos tipos de agregados.

Tipos de agregados

<p>↓</p> <p>Granulares o migajosos: de forma redondeada, típicos de horizontes superficiales.</p>	<p>↓</p> <p>Prismas: tienen formas más altas que anchas o profundas, son típicos de horizontes muy arcillosos.</p>	 <p>Prismática</p>
 <p>Granular</p>	 <p>Migajoso</p>	 <p>Columnar</p>
<p>↓</p> <p>Bloques: tienen forma de cubos con aristas marcadas (angulares) o redondeadas (subangulares).</p>	<p>↓</p> <p>Columnas: son como los prismas, pero afectados por excesos de sodio.</p>	<p>↓</p> <p>Laminares: son agregados en forma de láminas, típicos de horizontes lavados o compactados.</p>
 <p>Bloque angular</p>	 <p>Bloque subangular</p>	 <p>Laminar</p>

► **Figura 11.** Tipos de agregados



así como para las raíces de las plantas que crecen en él.

El tamaño de las partículas determina el diámetro de los poros donde se podrán alojar el agua y el aire. Aunque parezca contradictorio, las partículas más chicas tienen mayor capacidad de retención de agua. Los suelos arenosos tienen una alta proporción de partículas grandes, por lo que retienen poco el agua, que drena hacia abajo, en el perfil, con mayor facilidad. Lo “bueno” de esto, en sentido agronómico, es que impide que el suelo se encharque y permite que siempre haya aire disponible para las raíces y los organismos que habitan allí; lo “malo” es que el agua se escapa y está poco tiempo disponible para que la tomen esas raíces.

→ **Capacidad de intercambio catiónico**

El reconocimiento de los agregados permite entender algunas cuestiones relativas a la “biografía” del suelo, y nos da una idea de su calidad para permitir el desarrollo de la vegetación, al revelar cómo se formó, qué minerales presenta, si estuvo sometido a excesos de agua, si va a permitir el paso del agua y de las raíces, etc.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo está relacionada con la existencia de unas partículas muy pequeñas denominadas coloides. Su nombre proviene del latín, *colla*, “pegamento”. Los coloides del suelo pueden ser orgánicos o inorgánicos, según si las partículas son minerales (arcillas) u orgánicas (materia orgánica estable).

La estructura del suelo puede ser modificada durante el proceso de producción agropecuaria. Las labranzas, el paso de la hacienda o de tractores y máquinas pesadas, la incorporación de residuos vegetales que se transformarán en materia orgánica son algunos de los factores que pueden cambiar (empeorar o mejorar) la estructura del suelo.

Los coloides son los principales responsables de la actividad química del suelo, ya que las partículas coloidales, además de ser pequeñas, tienen cargas, usualmente negativas, lo que las vuelve sumamente reactivas. Esto les permite retener partículas con cargas positivas





(cationes) y hace que, dependiendo de la cantidad de cargas del coloide, algunos minerales estén o no disponibles para ser absorbidos por las raíces. Por ello, cuanto mayor CIC tenga un suelo, mayor retención de agua, nutrientes y otras sustancias tendrá. De esta característica también depende la regulación del pH del suelo, es decir, que un suelo con alta CIC (por ejemplo, un suelo muy arcilloso) tiene un mayor poder *buffer*, es decir, un pH más estable ante factores desequilibrantes.

→ Acidez/alcalinidad (pH)

La acidez o la alcalinidad, expresadas a través del pH (potencial de hidrógeno), son la causa y la consecuencia de numerosos procesos del suelo, y pueden limitar el crecimiento de algunas plantas. La mayoría de las plantas se desarrolla mejor en un rango de pH de entre 6,0 y 7,5. Algunas pueden adaptarse a suelos un poco más ácidos (menor pH) o más alcalinos (mayor pH), pero siempre pierden algo de crecimiento cuando el pH no está dentro de los valores óptimos.

► **Figura 12.** Valores más deseables de pH según cultivos

Fuente: Edafología.net

Valores de pH más deseables para distintos cultivos

• Cultivo	Intervalo de pH		• Cultivo	Intervalo de pH		• Cultivo	Intervalo de pH	
	Mínimo	Máximo		Mínimo	Máximo		Mínimo	Máximo
Acelga	6,0	7,5	Col	5,5	7,5	Nabo	5,5	6,8
Citricos	6,0	7,5	Col Bruselas	5,7	7,3	Nogal	6,0	8,0
Damasco	6,0	7,0	Coliflor	6,0	7,3	Olivo	6,0	8,0
Alfalfa	6,2	7,8	Colza	6,0	7,5	Orquídea	4,0	5,0
Algodón	5,0	6,0	Escarola	5,6	6,7	Papa	4,8	6,5
Agrostis	5,0	6,0	Espárrago	6,2	7,7	Pepino	5,7	7,3
Almendro	6,0	7,0	Espinaca	6,2	7,6	Peral	5,6	7,2
Apio	6,1	7,4	Festuca ovina	4,5	6,0	Pimiento	7,0	8,5
Arroz	5,0	6,5	Festuca pratense	4,5	7,0	Pino	5,0	6,0
Avellano	6,0	7,0	Fleo	5,5	8,0	Plátano	6,0	7,5
Avena	5,0	7,5	Frambuesa	5,5	7,0	Poa pratense	5,5	7,5
Ballico	6,0	7,0	Fresa	5,0	6,5	Rábano	6,0	7,5
Begonia	5,5	7,0	Gardenia	5,0	6,0	Remolacha	6,1	7,4
Berenjena	5,4	6,0	Girasol	6,0	7,5	Rosal	5,5	7,0
Batata	5,1	6,0	Gramma	5,5	7,2	Soja	6,0	7,0
Brócoli	6,0	7,3	Arvejas	6,0	7,5	Tabaco	5,5	7,5
Maní	5,3	6,6	Chauchas	5,6	7,0	Tomate	5,5	7,0
Calabaza	5,6	5,7	Lechuga	5,5	7,0	Trébol blanco	5,6	7,0
Caña azúcar	6,0	8,8	Lino	5,0	7,0	Trébol híbrido	5,5	7,0
Castaño	5,0	6,5	Maiz	5,5	7,5	Trébol rojo	5,5	7,5
Cebada	6,5	8,0	Manzano	5,4	6,8	Trébol violeta	5,7	7,6
Cebolla	6,0	7,0	Melilotus	6,5	7,5	Trigo	5,5	7,5
Centeno	5,0	7,0	Melón	5,7	7,3	Vicia	5,2	7,0
Cerezo	6,0	7,5	Melocotonero	5,2	6,8	Vid	5,4	6,8
Clavel	6,0	7,5	Membrillero	5,7	7,2	Zanahoria	5,7	7,0

Cuando los valores de pH son bajos, puede haber toxicidad por aluminio, o deficiencias de calcio o potasio. Cuando los pH son altos, se relacionan con contenidos de sodio elevados, que afectan la estabilidad estructural del suelo y condicionan su calidad física.

El pH de los suelos puede ser alterado por las prácticas agronómicas. La principal causa de acidificación del suelo por razones productivas es que las plantas, para formar sus tejidos vegetales, absorben grandes cantidades de calcio y magnesio, minerales que contribuyen a mantener los niveles de pH más elevados, y los sitios donde estaban estos dos cationes son ocupados por hidrógeno, que tiende a acidificar el suelo. En el otro extremo, la principal causa de la alcalinización de suelos agrícolas es el riego con agua subterránea de baja calidad o con prácticas inadecuadas. Estos cambios de pH pueden corregirse con enmiendas con calcio y magnesio.

→ Materia orgánica (MO)

En general, podemos identificar la presencia de materia orgánica (MO) a simple vista, porque es más oscura que el resto de los componentes del suelo: la famosa y deseada "tierra negra", conformada por residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición.

La materia orgánica está compuesta por un 58% de carbono (C) y cantidades variables de hidrógeno (H), oxígeno (O), azufre (S), fósforo (P) y nitrógeno (N).

El contenido porcentual de materia orgánica (%MO) es muy importante porque se relaciona con la capacidad del suelo de retener y brindar los nutrientes necesarios para el desarrollo de las plantas.

La presencia de materia orgánica mejora también la estructura del suelo, al ayudar a la formación de agregados que permiten la existencia de poros donde se alojan el agua y el aire y donde pueden crecer las raíces y los microorganismos.

Además, la materia orgánica es fuente de energía y nutrientes para los organismos y microorganismos que viven en el suelo. Estos cumplen funciones fundamentales en el proceso por el cual el material orgánico (restos vegetales y animales) se transforma en materia orgánica estable, que es la verdadera fuente de nutrientes para las plantas y otros organismos.

Es por ello que suelos con altas cantidades de materia orgánica tienen elevada actividad y diversidad biológica.



El pH de los suelos puede ser alterado por las prácticas agronómicas.

>. El suelo, fuente de nutrientes

El suelo es la principal fuente de nutrientes para las plantas y microorganismos que viven en él. Para desarrollarse, las plantas necesitan 16 nutrientes esenciales. Algunos elementos como el carbono, el hidrógeno y el oxígeno (C, H, O) no son absorbidos por las raíces, dado que durante el proceso de fotosíntesis la planta incorpora el C y el O directamente desde la atmósfera y el H del agua del suelo, y los convierte en hidratos de carbono o azúcares sencillos.

Los nutrientes que son absorbidos por el suelo

se clasifican a su vez en primarios o macronutrientes, secundarios o mesonutrientes, y micronutrientes, según las cantidades que la planta requiere de cada grupo. Es importante aclarar que los micronutrientes no son menos necesarios: la planta requiere de todos y cada uno de los nutrientes en las cantidades adecuadas, y su desarrollo se ve afectado si le falta alguno. Un suelo que tiene la capacidad de hacer disponibles para las plantas los nutrientes esenciales es un suelo fértil, saludable, que no limita el desarrollo potencial de las plantas.

Clasificación de los nutrientes principales según la cantidad que requieren las plantas

• Macronutrientes	• Mesonutrientes	• Micronutrientes
Nitrógeno	Azufre	Zinc
Fósforo	Calcio	Boro
Potasio	Magnesio	Hierro
		Manganeso
		Cobre
		Molibdeno
		Cloro

► **Figura 13.** Clasificación de los nutrientes principales según la cantidad que requieren las plantas



Un suelo fértil, saludable, es capaz de hacer disponibles los nutrientes esenciales para las plantas. El conjunto de procesos y fracciones necesarios para ello se denomina **ciclo de los nutrientes**.

Los nutrientes del suelo que pueden "alimentar" a las plantas provienen del material original y del reciclaje de los residuos vegetales y animales que se descomponen, se transforman y dan lugar a las moléculas que pueden ser asimiladas (absorbidas) por las plantas. Al conjunto de procesos y fracciones por los que puede pasar un nutriente se lo estudia como ciclo de los nutrientes.

Cada nutriente tiene su propio ciclo, que difiere en menor o mayor medida de los demás. En cada uno hay moléculas que las plantas y microorganismos pueden absorber, moléculas que son retenidas por el suelo, moléculas que entran al sistema suelo-planta y moléculas que se pierden. Conocer los ciclos permite tomar decisiones de uso y manejo para aprovechar lo mejor posible los nutrientes, y evitar excesos o déficits.

Disponibilidad, excesos y déficits

Además de estar presentes en los suelos, los nutrientes tienen que estar disponibles para las plantas.

¿Qué quiere decir esto? En la naturaleza los nutrientes están en el suelo, pero en muchos casos la molécula química de la que forman parte no puede ser absorbida directamente por las raíces. Por eso, tienen que atravesar una serie de procesos, que difieren de acuerdo con el nutriente y la forma en que esté, por los que distintos factores (como la temperatura, la humedad, los organismos del suelo) interactúan para ir transformándolos hasta llegar a la molécula que la planta puede absorber. En este caso, se dice que



→ el nutriente está disponible y es asimilable por la planta.
→

A las personas les pasa algo similar: por ejemplo, necesitan calcio, que está presente en las cáscaras de huevos, pero como no pueden digerir cáscaras, ese calcio, aunque esté al alcance, no está disponible para el organismo humano, ya que no lo puede asimilar.

A veces, un nutriente escasea tanto que aparecen síntomas en las plantas. En este caso, decimos que el nutriente es deficitario o que hay un déficit del nutriente. Pero en general no hay síntomas visibles de estas insuficiencias. En estos casos, si bien la planta puede desarrollar su ciclo, no logra alcanzar su máximo potencial de crecimiento. Así, se puede perder parte de la producción que se podría haber obtenido con una buena dotación de nutrientes, o los alimentos resultantes presentan bajos contenidos de

estos elementos, con lo que resultan menos nutritivos.

También puede darse el caso de un exceso de nutrientes, lo que genera un desbalance y, en algunos casos, toxicidad, especialmente cuando se agregan directamente sobre los tejidos vegetales. La toxicidad puede limitar el crecimiento de la planta y hasta causarle la muerte.

Importancia del análisis del suelo: es clave un buen diagnóstico

Así como el análisis del suelo permite conocer sus características, también puede indicar la disponibilidad de los nutrientes. Esta información permite detectar posibles deficiencias de nutrientes, calcular cuánto fertilizante, de qué tipo y en qué momento debe agregarse para asegurar el buen desarrollo de las plantas y la conservación o mejora del estado nutricional del suelo.



► **Figura 14.** Análisis de suelo en el laboratorio.

Fuente: <https://agrilifeextension.tamu.edu>

Transpiración

Las plantas absorben nutrientes del suelo, pero ¿cómo lo hacen?

Los nutrientes que están disponibles para la planta son los que están disueltos en el agua presente en los poros del suelo, lo que se llama solución del suelo. ¿Cómo hace la planta para absorber esta solución? La respuesta está en el proceso de transpiración. Las plantas liberan a la atmósfera vapor de agua, principalmente desde los poros (estomas) de las hojas; al perder agua, se va generando un gradiente dentro de la planta (menos humedad en las hojas que en las raíces).

Como el agua se mueve de una zona de mayor concentración de vapor de agua a una de menor, se produce un movimiento ascendente de agua. Esto además estimula la absorción de agua por las raíces, que ingresa con los nutrientes disueltos en ella (Figura 15).

Como el agua se evapora sobre todo desde las hojas, una planta con mucha área foliar transpirará mucho y, por lo tanto, hará circular mucha agua y nutrientes, lo que le permitirá crecer más. La superficie foliar depende de la disponibilidad de agua y nutrientes, y, a su vez, el aprovechamiento del agua y los nutrientes depende de la superficie foliar fotosintética.

Si los nutrientes son limitantes, aunque haya agua suficiente la planta no desarrollará una gran área foliar y, por lo tanto, va a transpirar menos y a crecer menos. El ideal para lograr altos niveles de crecimiento vegetal es tener adecuados niveles de humedad y fertilidad en el suelo, para que la planta pueda transpirar todo lo posible y así alcanzar su máximo potencial de rendimiento, transformando el agua y los nutrientes en tejido vegetal.

► **Figura 15.** Proceso de transpiración de las plantas.

Fuente: Elaboración propia.



Fuentes de nutrientes

→ Los nutrientes presentes en los suelos pueden provenir de distintas fuentes:

→ **► Meteorización de la roca madre.** Es la fuente natural de la mayoría de los nutrientes, sobre la que no es posible influir.

► Deposición atmosférica (principalmente de nitrógeno y azufre). Esta deposición es importante en países industrializados del hemisferio norte, y puede conducir a fenómenos de "lluvia ácida".

► Depositiones animales (denominadas comúnmente estiércol o bosta). Este componente varía mucho en función del tipo de alimentación de los animales, que, con sus deyecciones, devuelven al suelo, en definitiva, parte de lo que tomaron de los vegetales y no aprovecharon. Un tema importante es la distribución de estos nutrientes, ya que la reposición al suelo ocurrirá específicamente en la zona en la que se deposite el estiércol.

► Fijación biológica de nitrógeno (FBN). Este proceso se da naturalmente en bacterias libres o cuando determinado grupo de bacterias con capacidad de fijar nitrógeno (Rizobiáceas) se asocia a las raíces de las leguminosas. Pero también puede potenciarse artificialmente, inoculando semillas de leguminosas con bacterias fijadoras de nitrógeno de alta eficiencia.

► Aplicación de fertilizantes. Estas sustancias contienen uno o más nutrientes esenciales, acondicionados especialmente para que puedan transportarse y esparcirse en los lotes, y las plantas puedan aprovecharlos fácilmente.

► Aportes con agua de riego. El agua con

que se riega puede contener nutrientes naturalmente, por lo que es recomendable contar con análisis de agua para conocerlos. También se pueden incorporar algunos nutrientes al agua de riego, en una práctica conocida como "fertirrigación".

► Abonado. Consiste en aplicar residuos orgánicos más o menos descompuestos. Una forma bastante difundida es la aplicación de residuos que atravesaron el proceso de compostaje, que es una descomposición de los materiales controlada. Durante este proceso, con condiciones adecuadas de humedad y temperatura, el material orgánico se transforma en materia orgánica estabilizada, con nutrientes listos para aplicar al suelo. La cantidad y calidad de estos nutrientes es muy variable ya que depende del material que se haya agregado al compost. Es una muy buena opción para superficies chicas, como una huerta.

► Residuos biológicos urbanos. Esta fuente de nutrientes proviene de agua de tratamiento domiciliario acondicionada para aplicar en el campo, lo que se denomina también "barros cloacales". Pueden aportar nutrientes muy valiosos, pero su composición es muy variable, por lo que es conveniente analizarlos para determinar el contenido de nutrientes y la posible presencia de contaminantes (especialmente, metales pesados).

De todas estas fuentes de nutrientes del suelo, es fundamental el buen uso de aquellas sobre las que es posible influir, que son la fertilización, el abonado y, en algunas situaciones, los aportes con el riego.

De todas las fuentes de **nutrientes** del suelo, es fundamental hacer un buen uso de aquellas que se pueden manejar: la fertilización, el abonado y, a veces, el riego.

Macronutrientes

Existen tres nutrientes que las plantas absorben en cantidades muy superiores al resto, que son el nitrógeno, el fósforo y el potasio.

El nitrógeno es el más importante en cuanto a la magnitud de las necesidades de las plantas y la cantidad y relevancia de las funciones que cumple.

El fósforo, a pesar de que en muchos casos es absorbido en menor cantidad que el

potasio, suele ser limitante para el crecimiento de las plantas en muchos ecosistemas. Es por ello que el escritor y químico Isaac Asimov lo llamó "el cuello de botella de la vida".

El potasio, por su parte, es clave para muchas funciones de las plantas, como, por ejemplo, el mantenimiento de la turgencia celular.



→ Nitrógeno



El nitrógeno (N) es un componente fundamental de las proteínas, que son macromoléculas orgánicas formadas por cadenas de aminoácidos y cumplen numerosas funciones en todos los seres vivos.

Algunas proteínas en los seres humanos y sus funciones

- **Miosina:** forma parte de los músculos.
- **Colágeno:** le da elasticidad a la piel.
- **Hemoglobina:** se encarga de transportar el oxígeno en la sangre.

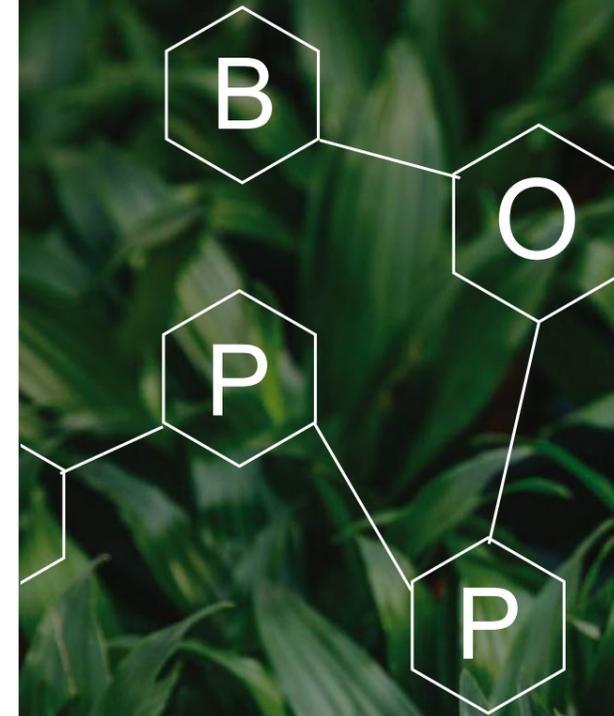
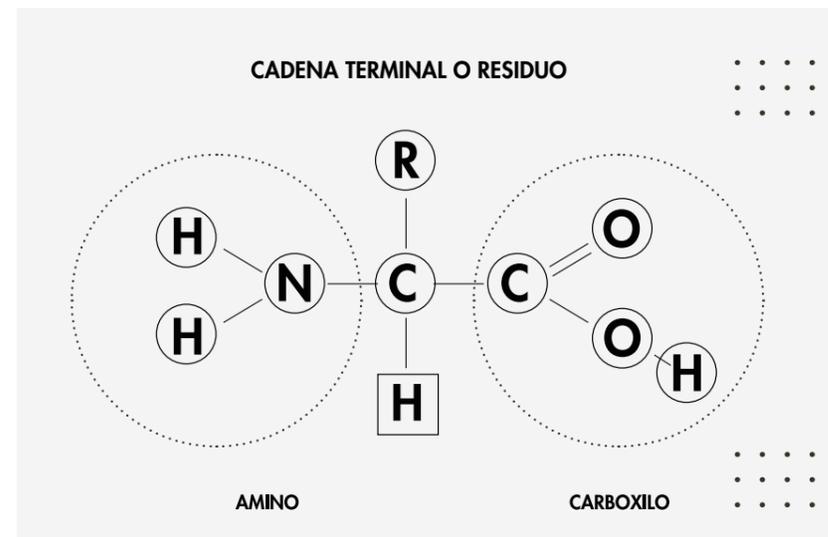
Estas proteínas humanas necesitan nitrógeno para sintetizarse, que obtienen de las proteínas animales y vegetales de los alimentos.

En el aire abunda el nitrógeno, aunque ni las plantas ni los animales pueden aprovecharlo directamente de la atmósfera. Existen microorganismos específicos que sí pueden capturarlo y hacerlo disponible para las plantas, las que a su vez lo transforman en proteínas vegetales, que luego los animales pueden convertir en proteínas específicas de cada especie.

► **Figura 16.** Estructura de un aminoácido
Fuente: <https://www.uaeh.edu.mx>

El nitrógeno también es fundamental para las plantas: forma parte de la clorofila, su pigmento verde característico, que es responsable de captar la energía solar para el proceso de fotosíntesis. La disponibilidad adecuada de nitrógeno es requisito para mantener verdes las hojas y lograr la densidad de cloroplastos por unidad de superficie que asegure la eficiencia de la fotosíntesis. El nitrógeno forma parte de las vitaminas y también de los aminoácidos que son los componentes de las proteínas (Figura 16).

Una planta sin déficit de nitrógeno presenta hojas de un color verde intenso. Por el contrario, cuando el nitrógeno es escaso, las hojas se vuelven más amarillas, porque no es suficiente para sintetizar la clorofila en cantidades adecuadas. Una particularidad es que se amarillean primero las hojas más viejas, ya que la planta, al "sentir" la falta de nitrógeno, envía el nitrógeno de las hojas viejas a las nuevas, proceso que se denomina retranslocación. Al no poder realizar la fotosíntesis de manera adecuada por la falta de clorofila, la planta crece lentamente.



El **nitrógeno (N)** es un componente fundamental de las proteínas, que son macromoléculas orgánicas formadas por cadenas de aminoácidos.



El nitrógeno orgánico constituye el 97% del nitrógeno del suelo, pero no puede ser tomado directamente por las plantas.



Ciclo del nitrógeno

El nitrógeno presente en el suelo se encuentra en formas orgánicas e inorgánicas:

Nitrógeno orgánico:

Está contenido en la materia orgánica y constituye el 97% del nitrógeno del suelo, pero no puede ser tomado directamente por las plantas.

Nitrógeno inorgánico:

- ▶ Amonio (NH_4^+) soluble o retenido por las cargas negativas del coloide del suelo. En solución, puede ser absorbido por las raíces.
- ▶ Aniones nitrito (NO_2^-) y, especialmente, nitratos (NO_3^-), solubles en la solución del suelo. Estos aniones están "libres" y, al estar poco retenidos por los coloides, pueden ser absorbidos por las plantas, pero también pueden perderse por lavado.

El aire está compuesto en casi 80% de nitrógeno, y de allí proviene casi todo el que se encuentra en el suelo. La principal entrada de nitrógeno al suelo es un proceso denominado fijación biológica de nitrógeno (FBN), por el

cual algunas bacterias de la familia de las Rizobiáceas, que tienen la capacidad de asimilar directamente el nitrógeno gaseoso (N_2), lo toman o fijan transformándolo en NH_3 , que luego se convierte en NH_4^+ y NO_3^- , formas en que las plantas absorben el nitrógeno. El NO_3^- se reduce dentro de las plantas y pasa a NH_4^+ , y se convierte en aminoácidos que formarán sus proteínas. En las últimas décadas, está creciendo en importancia relativa la incorporación de nitrógeno al suelo vía fertilización. Existen también otras entradas de menor magnitud, como el aporte de nitrógeno vía deposición por lluvias, luego de la oxidación por descargas eléctricas de N_2 a compuestos nitrogenados, o por oxidación de combustibles fósiles.

El nitrógeno que absorben las plantas retorna al suelo de dos maneras: con las plantas que mueren, incorporadas al suelo por los organismos descomponedores, y con los excrementos de los animales que comieron las plantas o a otros animales que las comieron, así como con sus restos cuando mueren. Este nitrógeno

llega al suelo en principio dentro de los tejidos que se mueren, es decir, en formas orgánicas (Figura 17).

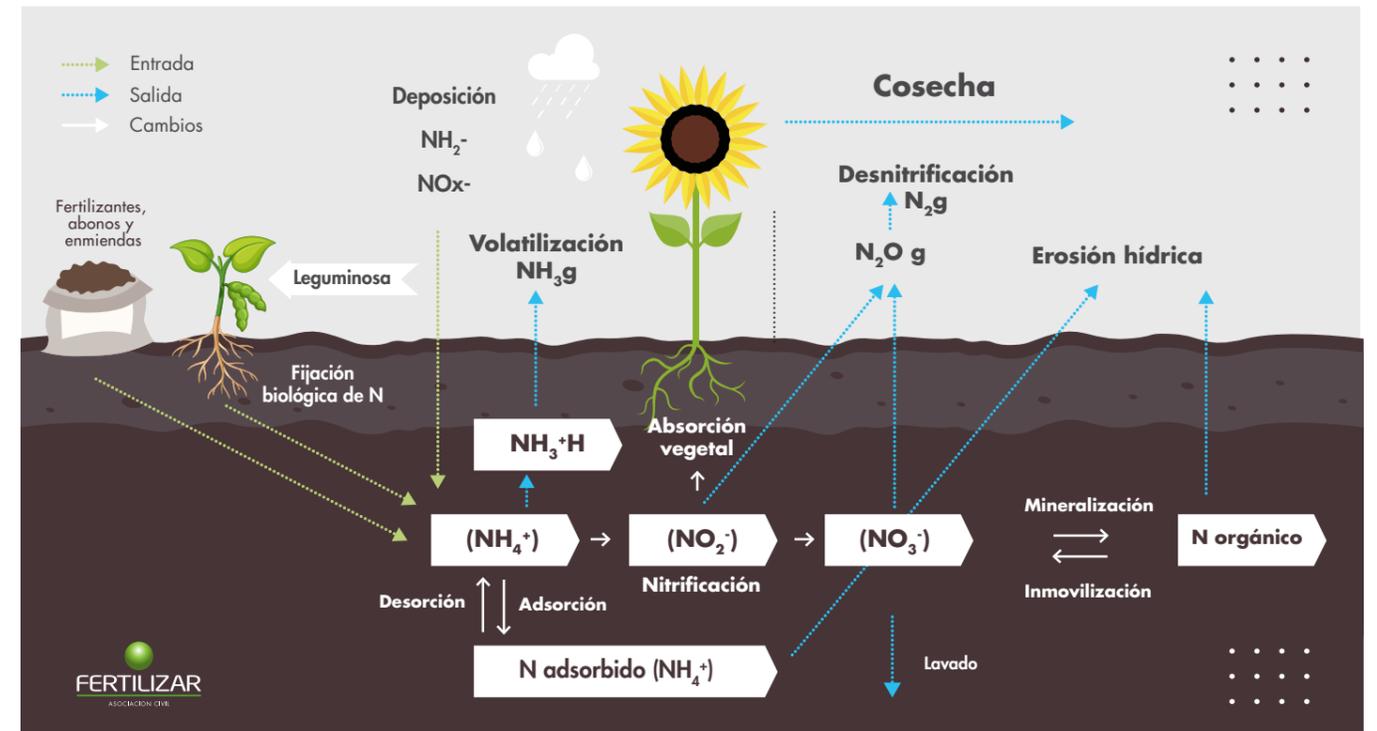
Para lograr que haya nitrógeno disponible para las plantas es necesario que el nitrógeno orgánico pase a las formas inorgánicas. Este proceso, llamado mineralización, es realizado por microorganismos que transforman la materia orgánica en compuestos minerales. En todo este proceso cobran un papel fundamental los microorganismos y organismos encargados de la descomposición del material orgánico (residuos vegetales y animales) y su transformación en materia orgánica con un alto contenido de nutrientes, de los que el nitrógeno es el

fundamental. Las condiciones de humedad y temperatura, el pH del suelo y la disponibilidad de carbono afectan este proceso, y es fundamental la disponibilidad de oxígeno, que lo acelera.

Una vez que el nitrógeno, con la ayuda de los organismos descomponedores, llega a la forma de amonio y nitratos, puede ser aprovechado por las plantas (continuando el ciclo), y también por los microorganismos que lo necesitan para sus funciones vitales. Al proceso de incorporación de los nitratos y el amonio a los tejidos de los microorganismos, que así dejan de estar en solución, se lo llama inmovilización.



► **Figura 17. Ciclo del nitrógeno**
Fuente: Adaptado de Ciarlo (2019)



→ La mineralización y la inmovilización ocurren simultáneamente en el suelo.

→ La inmovilización es más intensa cuando la relación carbono/nitrógeno (C/N) del material a descomponer es muy alta (es decir, tiene mucho carbono y poco nitrógeno). Esto hace que las bacterias tengan que absorber nitrógeno de otro lado, y como lo toman de la solución del suelo, las plantas pueden sufrir una falta transitoria de este elemento. Hay que tener esto en cuenta y evaluar la necesidad de aplicar fertilizantes nitrogenados para evitar deficiencias de nitrógeno en las plantas que compiten por este elemento.

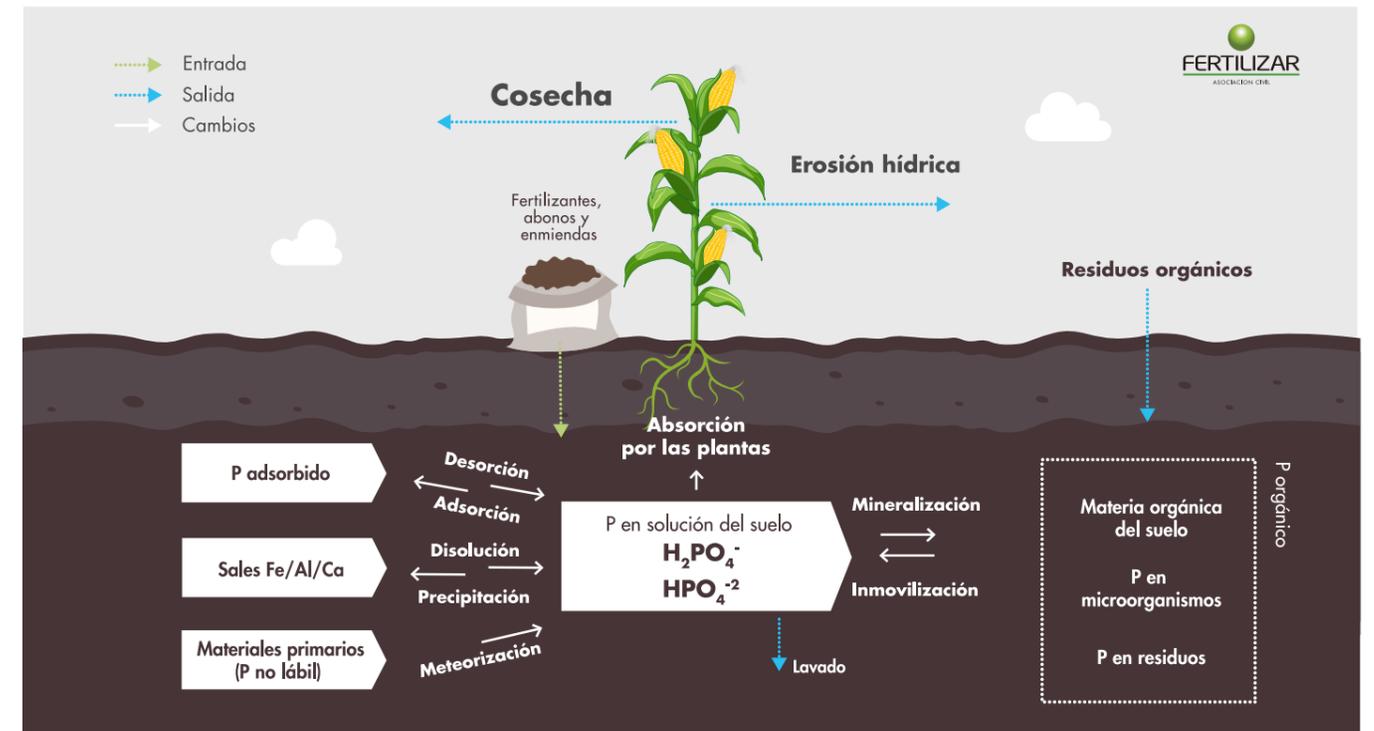
El nitrógeno puede perderse en forma de nitratos si es arrastrado por el agua y llevado a la profundidad del suelo, lejos de las raíces, en el proceso conocido como lixiviación o lavado de nitratos. La cantidad de nitrógeno que puede perderse guarda relación con la capacidad del suelo de retenerlo. Las cargas negativas de

los coloides pueden retener el nitrógeno cuando se encuentra como NH_4^+ . Los suelos arenosos tienen menor CIC y pierden más fácilmente el nitrógeno. Por eso, la estructura y la textura del suelo son tan importantes.

Hay otras causas de pérdidas de nitrógeno, más allá del lavado de nitratos. Cuando el suelo se encuentra muy saturado de agua, que ocupa los poros y no deja oxígeno disponible, actúan unas bacterias adaptadas a esta situación de anaerobiosis (ausencia de oxígeno), que transforman los nitratos (NO_3^-) en gases (N_2O y N_2). Estos gases se escapan del suelo a la atmósfera en un proceso denominado desnitrificación. Esta pérdida es poco importante desde el punto de vista agronómico (en general, los suelos productivos no se inundan), pero sí desde un punto de vista ambiental: el óxido nitroso (N_2O) es uno de los gases de efecto invernadero (GEI) que provocan el cambio climático.



► **Figura 18.**
Raíz de una leguminosa nodulada.
Fuente: Legumehub.eu



Inoculación de semillas: del aire a la planta

Una herramienta agronómica muy importante para favorecer el proceso de fijación de nitrógeno atmosférico (FBN) es la inoculación de semillas de plantas leguminosas (como soja, alfalfa, trébol y vicia) con bacterias capaces de establecer una relación simbiótica con ellas, en la que las bacterias se alimentan de las plantas consumiendo los hidratos de carbono que estas elaboran y, "a cambio", fijan o transforman el nitrógeno atmosférico en las formas que las plantas pueden absorber.

La inoculación consiste en embeber las semillas con una solución que contiene abundantes bacterias fijadoras, justo antes de la siembra. A medida que la planta crece, las bacterias forman nódulos, estructuras mixtas planta-microbio especializadas, en las raíces de las plantas, y así se establece la relación simbiótica (Figura 19).

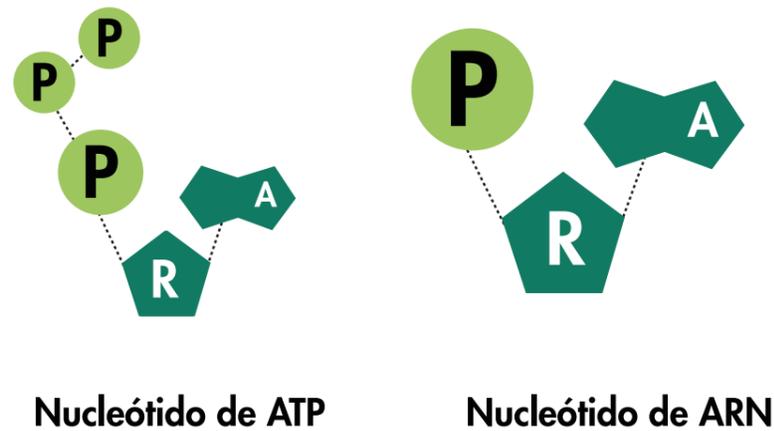
→ Fósforo

A diferencia del nitrógeno, que en su mayoría proviene de la atmósfera, el fósforo (P) procede de los minerales que dan origen al suelo. Así, existen zonas con distintos niveles de fósforo natural, que dependen de la roca originaria.

Los niveles de fósforo pueden verse alterados por los procesos de producción agropecuaria, si no se realiza la correspondiente reposición a través de la fertilización. Es decir, si se cosecha y no se fertiliza, el suelo va perdiendo fósforo y, por lo tanto, su capacidad de "hacer crecer" las plantas. Lamentablemente, los niveles de fósforo en los suelos argentinos están decayendo con el paso del tiempo, por eso es fundamental que tomemos conciencia de la importancia de reponer los nutrientes que nos llevamos en las cosechas y pastoreos.

► **Figura 19.**
Ciclo del fósforo.
Fuente: Adaptado de García y col. (2014)

► **Figura 20.** Participación del fósforo (P) en las moléculas de ARN y ATP.



Las moléculas en su composición tienen nucleótidos (en este caso A, correspondiente a Adenina) y un azúcar (en este caso R: Ribosa)



Las plantas absorben el fósforo de la solución del suelo, en forma de fosfatos (PO_4). Una vez que el fósforo es absorbido por las plantas, pasa a formar parte de sus compuestos orgánicos, entre otros, los ácidos nucleicos (ADN y ARN), la colina (vitamina) y los enlaces fosforilados (ATP y ADP). Es por su participación en estas moléculas que el fósforo resulta un elemento esencial para el desarrollo de los seres vivos, en procesos como la replicación de los genes, la síntesis de proteínas, la herencia y la transferencia de energía.

Para que el fósforo presente en los minerales del suelo (fracción mineral) o en los restos vegetales y animales (fracción orgánica) pueda ser aprovechado por las plantas, tiene que sufrir transformaciones físicas y químicas que lo conviertan en fosfatos solubles:

► **Meteorización:** Es la transformación de las fracciones minerales de fósforo insoluble en fosfatos en solución. Este proceso lleva mucho tiempo, y es más importante cuanto más joven sea el suelo o más rico el material original.

► **Desorción:** Los fosfatos retenidos en las cargas de las arcillas y la materia orgánica no son disponibles, deben liberarse de estas cargas para poder pasar a la solución del suelo.

► **Disolución:** El fósforo forma sales insolubles con el calcio, el hierro y el aluminio, y debe pasar por el proceso de disolución en agua para quedar disponible. La abundancia de estos compuestos insolubles, junto con la retención fuerte de los fosfatos sobre las arcillas, resultan en una muy baja movilidad general del fósforo en los suelos.



Los niveles de **fósforo** pueden verse alterados por la producción agropecuaria; si no se reponen a través de la fertilización, la capacidad de los suelos de “hacer crecer” las plantas decae.



► **Mineralización:** Son las transformaciones químicas realizadas por los microorganismos del suelo en las cuales compuestos de fósforo ligado a materiales orgánicos se convierten en compuestos minerales sencillos. El proceso de mineralización está altamente relacionado con las condiciones en las que los microorganismos que transforman la materia orgánica son más activos: alta temperatura, humedad y aireación adecuados, cantidad disponible de otros nutrientes y pH cercano a la neutralidad.

A grandes rasgos, se calcula que sólo entre 1 y 10% del fósforo total está disponible para las plantas en el mediano plazo, aunque hay que tener en cuenta que el fósforo disponible en la solución del suelo (disuelto) es muy bajo. Que haya mayor o menor proporción de fósforo disuelto depende de la cantidad

de arcillas y del pH. La máxima disponibilidad se da con valores de pH de entre 6,5 y 7. Esto se debe a que, con pH ácidos, el fósforo reacciona con el aluminio y el hierro formando compuestos insolubles. Con pH superiores a 8,3, el fósforo reacciona con el calcio formando compuestos de baja solubilidad. Cabe recordar que las plantas sólo pueden tomar aquellos nutrientes disueltos en la solución del suelo.

→ Potasio

El potasio (K) es absorbido por la planta como catión (K^+) y no forma compuestos orgánicos en ella, es decir, no pasa a ser parte de sus tejidos y, por lo tanto, tampoco se acumula en la materia orgánica de los suelos. Sin embargo, es fundamental para que



→ se lleven adelante los procesos metabólicos (activación de enzimas) de los que depende la formación de los tejidos.

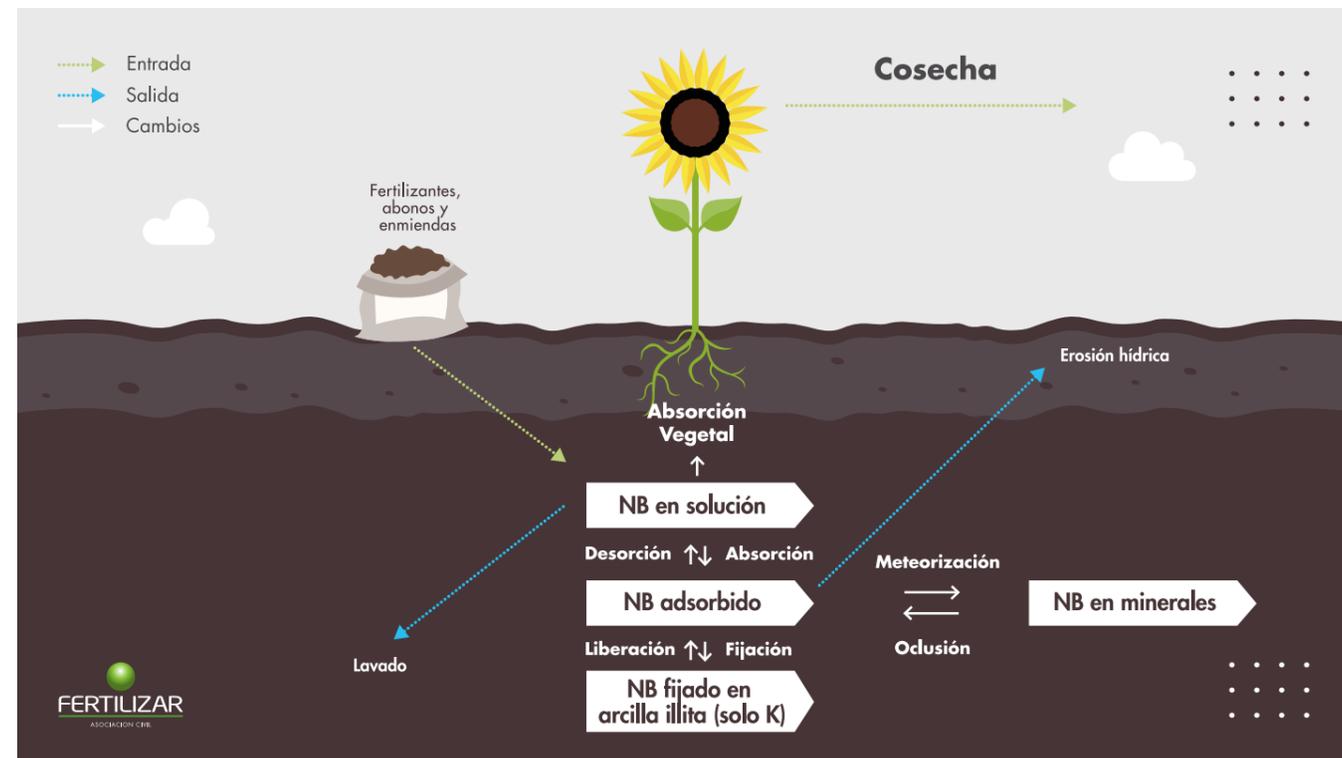
El potasio cumple muchas funciones importantes:

- Es necesario para el adecuado desarrollo de la fotosíntesis.
- Fortalece los mecanismos naturales de resistencia a enfermedades.
- Mejora la resistencia de la planta a la falta de agua, ya que interviene en la apertura y cierre de los estomas de las hojas por donde la planta transpira y "pierde agua".
- Mejora la resistencia de la planta a las heladas.

El potasio está presente en los minerales originarios del suelo. Como con el fósforo, solo

una muy pequeña fracción del potasio total está disponible para las plantas, aunque su movilidad en el suelo es menor que la del nitrógeno y mayor que la del fósforo.

El potasio en solución puede ser absorbido por las raíces, o retenido por adsorción (atracción de cargas electrostáticas opuestas) sobre las cargas de las arcillas, lo que evita su lavado profundo. En determinados tipos de arcilla, como la Illita, arcilla típica de praderas templadas, el potasio puede ubicarse entre los paquetes, en posiciones más ocultas y menos disponibles para las plantas, denominadas "potasio fijo". El potasio estructural, es decir, el que está formando parte de los minerales primarios del suelo, es el menos disponible, y constituye la reserva a mayor plazo de potasio del suelo, como se observa en la Figura 21.



► **Figura 21.** Ciclo de los nutrientes básicos (NB): potasio, calcio y magnesio

Fuente: Elaboración propia.

Nutrientes secundarios

El calcio, el magnesio y el azufre integran el grupo de los mesonutrientes, o nutrientes secundarios, que son demandados por los vegetales en menores cantidades que los macronutrientes, pero en mayor proporción que los micronutrientes.

→ Calcio

El calcio (Ca) se encuentra en el suelo como catión (Ca^{+2}), tal como lo necesita la planta para absorberlo. Los suelos ácidos suelen tener bajos contenidos de calcio. Como tiene cargas positivas, el calcio es retenido por las cargas negativas de los coloides del suelo (materia orgánica y arcillas). Como todos los iones, también está presente en la solución del suelo, que es de donde lo toman las plantas. La principal fuente de calcio son los minerales presentes en el suelo. El material orgánico que se descompone durante el ciclo de la materia también aporta calcio a las plantas y organismos.

Algunas de las funciones del calcio en la planta son:

- Estimula el desarrollo de las raíces y de las hojas.
- Forma parte de las paredes celulares, con lo que fortalece la estructura de la planta.
- Es necesario para activar varios sistemas de enzimas.
- Ayuda a reducir la acidez del suelo, y esto favorece las condiciones de crecimiento de las raíces y de los microorganismos, además del desarrollo de las bacterias fijadoras de nitrógeno, ya que son muy demandantes de calcio.

Las deficiencias de calcio se relacionan con que la planta tenga algunas funciones restringidas. Los síntomas son:

- Poco crecimiento de las raíces: se ponen negras y se pudren.
- Tejidos nuevos que se ponen gelatinosos al faltar estructura celular.
- Crecimiento en general limitado por la acidez del suelo, que no puede ser compensada por el calcio.

→ Magnesio

El magnesio (Mg) está presente en el suelo como catión (Mg^{+2}), por lo tanto, es retenido por sus cargas negativas y también está presente en la solución. Sin embargo, no es retenido tan fuertemente como el calcio, por lo que puede perderse por lixiviación o lavado en suelos arenosos y en zonas de mucha lluvia.

El magnesio presente en el suelo proviene inicialmente de la meteorización del material original o parental. El material orgánico que se descompone en el ciclo de la materia también aporta magnesio. Las fuentes de magnesio para reponer lo que extraen las cosechas son: la dolomita (que también aporta calcio), el sulfato de potasio y magnesio, y escorias básicas.

Las funciones del magnesio son varias:

- Es un componente fundamental de la molécula de clorofila, por lo tanto, es requerido para la fotosíntesis.



- • Es necesario para activar varios sistemas de enzimas.
- • Interviene en el metabolismo del fósforo.
- Es necesario para el proceso de respiración.

Como la carencia de magnesio hace que no pueda sintetizarse clorofila en cantidades adecuadas, las hojas viejas se ven amarillentas o rojizas, pero las nervaduras (venas) se mantienen verdes. Esto se debe a que la planta envía magnesio de las hojas viejas a las nuevas.

→ Azufre

Las fuentes principales de azufre para las plantas son la descomposición de la materia orgánica, el azufre atmosférico y el azufre presente en el agua. Las plantas toman el azufre (S) de la solución del suelo como sulfato (SO_4^{2-}), y, en mucho menor medida y en condiciones muy específicas (como en países industrializados del hemisferio norte, cercanía al mar o a volcanes), del aire, a través de las hojas, como dióxido de azufre (SO_2).

Los sulfatos del suelo no son retenidos como los fosfatos, y por ende pueden perderse por lavado. Por ello, el azufre puede acumularse en profundidad, y en determinadas condiciones pueden tomarlo las raíces profundas. Así, el agua de riego subsuperficial puede contener azufre, por lo tanto, es importante analizarla para considerar esta oferta.

El azufre atraviesa un ciclo similar al del nitrógeno, ya que, de la misma manera, los procesos son principalmente de óxido-reducción llevados a cabo por microorganismos (Figura 22).



► **Figura 22.** Ciclo biogeoquímico del azufre

Fuente: Elaboración propia.

Micronutrientes

Los micronutrientes son requeridos en muy poca cantidad, pero, como los macro y mesonutrientes, son indispensables para que las plantas logren un desarrollo saludable. De hecho, el déficit de micronutrientes limita el crecimiento de las plantas, e incluso puede llegar a causar su muerte o la falta de frutos.

Algunas funciones del azufre:

- Es fundamental para la síntesis de proteínas, ya que forma parte de algunos aminoácidos.
- Es necesario para la síntesis de vitaminas y enzimas.
- Es necesario para la síntesis de clorofila, aunque no forma parte de la molécula.
- Promueve la formación de nódulos en las leguminosas.
- Es importante para la formación de las semillas.

El azufre es un elemento clave en muchos mecanismos de defensa de la planta. Por ejemplo, está presente en compuestos irritantes, como los sulfóxidos presentes en la cebolla, o siendo precursor de cianuro en algunos vegetales como defensa ante la herbivoría.

Las deficiencias de azufre se observan en síntomas característicos como el color verde pálido, y en que las hojas nuevas se ven amarillentas y arrugadas. A diferencia de la deficiencia de nitrógeno y de magnesio, el azufre no se mueve de las hojas viejas a las nuevas. Como es necesario para la síntesis de proteínas, su carencia determina un crecimiento lento de la planta.

Los micronutrientes más importantes son:

- Zinc (Zn)
- Boro (B)
- Cobre (Cu)
- Cloro (Cl)
- Hierro (Fe)
- Manganeso (Mn)
- Molibdeno (Mo)

Cada cultivo tiene sus propios requerimientos de nutrientes, que también varían a lo largo de su ciclo de crecimiento. Esto es importante para decidir la fertilización. En el caso de los micronutrientes, hay que prestar especial atención a las cantidades relativas en el suelo. Por lo tanto, al analizar los resultados de los análisis de suelo, no solo hay que tener en cuenta los valores absolutos, sino también las relaciones e interacciones de los micronutrientes, entre sí y con los meso y macronutrientes.

Las principales fuentes de micronutrientes son el material orgánico que se descompone e incorpora al suelo, y la liberación desde los compuestos minerales. El pH del suelo afecta fuertemente su disponibilidad: a mayor pH (alcalinidad), menor disponibilidad de la mayoría de los micronutrientes. Las excepciones son el molibdeno (Mo), que mejora su disponibilidad con pH alcalinos, y el cloro (Cl), que no responde a los cambios de pH.



Suelo, nutrición y alimentos

→ Como muestra la Figura 23, los nutrientes que la planta necesita para desarrollar sus funciones y sintetizar sus tejidos son los mismos que también cumplen funciones fundamentales en los seres humanos.

Un caso particular es el zinc, un nutriente que las plantas requieren en bajas cantidades, pero cuya falta en las dietas humanas es una preocupación a nivel global, ya que afecta a un tercio de la población, y esto se asocia a su bajo contenido en los suelos (Figura 24).

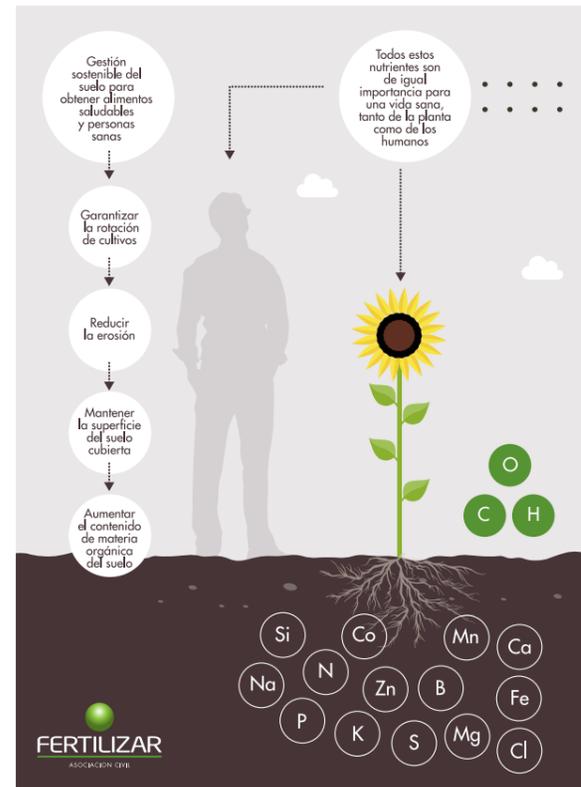
La cantidad de nitrógeno disponible ofrece un ejemplo claro de la relación entre nutrientes del suelo y calidad nutricional de los granos u otros productos cosechados. Si por bajos contenidos de nitrógeno en el suelo no se logran sintetizar proteínas en la cantidad necesaria, los granos y las distintas partes de la planta tendrán bajos contenidos de proteína. Por lo tanto, los animales que se alimenten de estos granos o plantas recibirán un menor aporte de proteínas del que hubieran obtenido de un cultivo desarrollado en un suelo bien provisto de nitrógeno.

Este tema es fundamental si se considera que la producción agropecuaria debe responder a la demanda de alimento de la creciente población mundial.

Las relaciones entre nutrientes también pueden alterar la calidad nutricional de los granos y forrajes. Por ejemplo, fertilizar con potasio las gramíneas para pastoreo reduce la absorción de magnesio, con lo que los animales que se alimentan de estos pastos pueden tener un desorden conocido como

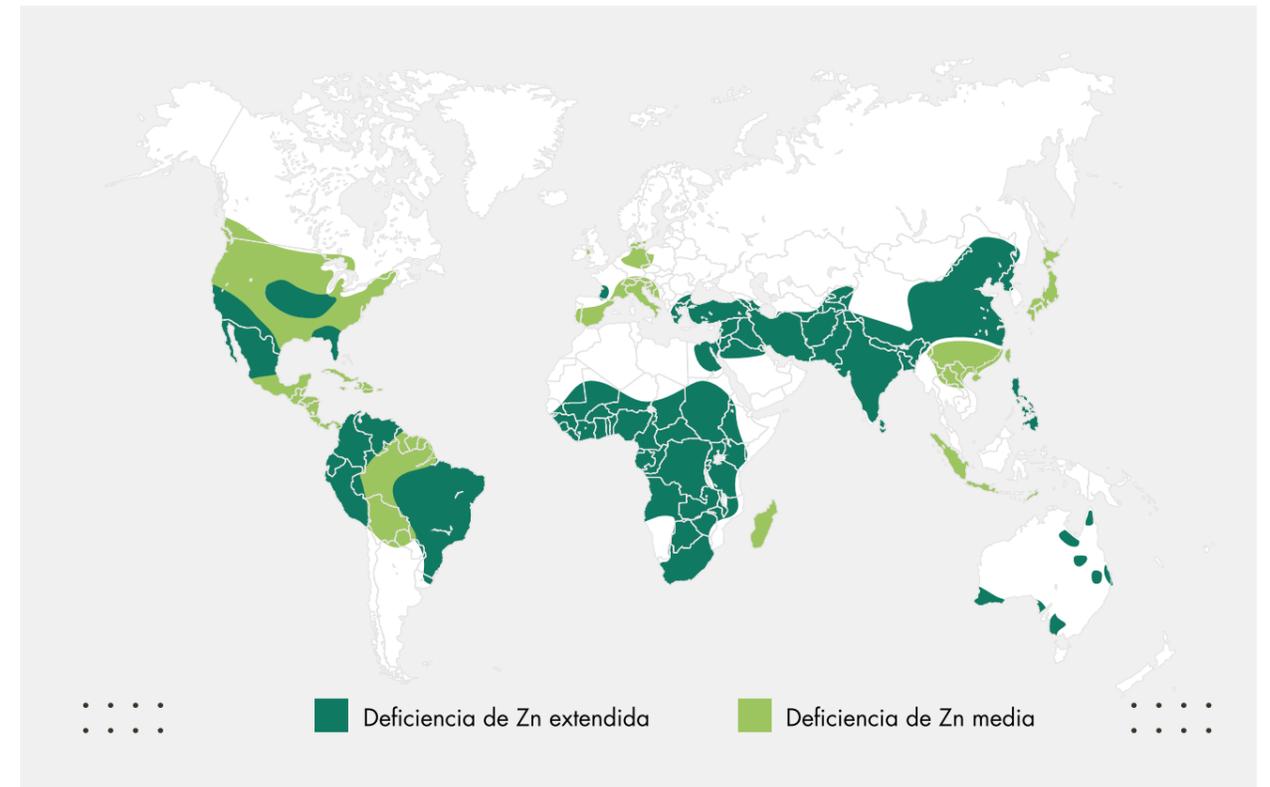
“tetania de los pastos” o hipomagnesemia. Esta situación es más frecuente cuando las temperaturas son bajas y hay alta humedad en el ambiente.

Por esta razón, cuando se dan estas condiciones, se suele suplementar a los animales con sales que incluyen magnesio. Este es otro buen ejemplo de cómo lo que pasa en el suelo influye en la calidad de los alimentos.



► **Figura 23.** Suelo, la base de la nutrición
Fuente: Elaboración propia

►► Los **nutrientes** que las plantas necesitan para desarrollar sus funciones y sintetizar sus tejidos son los mismos que cumplen funciones fundamentales en los seres humanos.



► **Figura 24.** Deficiencias globales de zinc en los suelos
Fuente: Alloway (2008).



El uso agrícola tiende a disminuir inicialmente los niveles de **materia orgánica** con respecto a los ecosistemas nativos. ▶▶

>. Conservación de los suelos y el ambiente

Pérdida de materia orgánica

El aumento de la población mundial exige mayor cantidad de alimentos. Para satisfacer esta demanda creciente hay que incorporar más superficie a la actividad agropecuaria. Esto inevitablemente altera el equilibrio en esas zonas que ingresan a los circuitos productivos. Además, la necesidad de alimento exige alcanzar altos niveles de producción por hectárea, lo que implica que muchos nutrientes del suelo se extraigan con las cosechas y los animales que se alimentan de esa producción. Si no se maneja adecuadamente, el suelo dedicado a la producción agropecuaria puede degradarse, con una producción vegetal cada vez menor.

A continuación, se describen algunas de las formas en que el suelo que se usa para la producción agropecuaria puede verse afectado.

La materia orgánica del suelo es el producto de la descomposición y transformación de los restos vivos que llegan a él; los restos vegetales son los más importantes en cantidad e interacción con la matriz del suelo.

El uso agrícola, fundamental para la producción de alimentos y otros bienes, tiende a disminuir inicialmente los niveles de materia orgánica con respecto a los ecosistemas nativos, debido a un menor tiempo de producción de biomasa (en general, los cultivos de cosecha producen durante 5 a 6 meses) y a un menor nivel de producción vegetal en general.

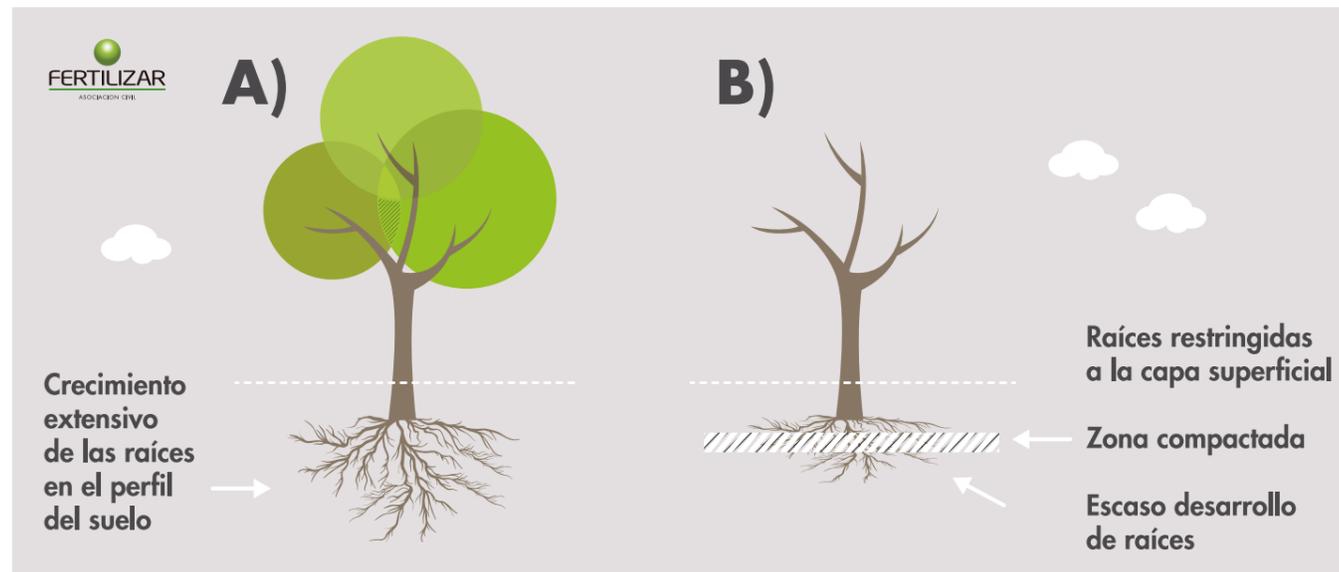
Esta pérdida de materia orgánica puede acelerarse con prácticas de manejo inadecuadas e, inversamente, puede morigerarse y hasta revertirse cuando la producción de cultivos se realiza en forma consciente, profesional y llevando a cabo las mejores prácticas de manejo para cada suelo y situación particular. →

→ La materia orgánica tiene varias propiedades que la convierten en el componente clave de los suelos para la vida en este planeta, por lo que su pérdida es un deterioro definitivo de la salud y la calidad del suelo. Las siguientes son algunas de sus propiedades:

- ▶ Es fuente de nutrientes, en algunos casos determinante, como en el nitrógeno y el azufre.
- ▶ Balancea el sistema poroso del suelo, por lo que contribuye a retener agua en suelos con escasa retención (arenosos), y aumenta el drenaje de suelos naturalmente mal drenados.
- ▶ Mejora la estabilidad física de los agregados (estructura) del suelo, permitiendo la durabilidad y consistencia del sistema poroso.
- ▶ Contribuye a la regulación de la temperatura del suelo.
- ▶ Es la fuente de energía principal para la inmensa actividad microbiológica que existe en los suelos.
- ▶ Aumenta el poder de regulación del suelo frente a cambios externos, por ejemplo, en el pH.
- ▶ Es un reservorio factible de carbono atmosférico, requerido para la mitigación del cambio climático global.

Pérdida de fertilidad física

La principal pérdida de fertilidad física en los suelos agrícolas, sobre todo bajo sistemas de siembra directa (sin remoción del suelo), es la compactación del suelo, evidenciada por una disminución de la porosidad, especialmente de los macroporos, responsables de la aireación y drenaje, y lugar físico para el crecimiento de las plantas. Esta compactación puede tener varios orígenes, pero principalmente se genera como consecuencia de la pérdida de materia orgánica, principal aglutinante de los agregados del suelo, a las labranzas, debido al paso de máquinas agrícolas de alto peso o al pisoteo animal en condiciones de baja capacidad portante (alta humedad). La disminución de porosidad genera problemas de aireación, drenaje y baja exploración de agua y nutrientes por las raíces, que suelen crecer deformadas, como muestra la Figura 25.



▶ **Figura 25.** Impacto de la compactación del suelo en las raíces

Fuente: Elaboración propia.

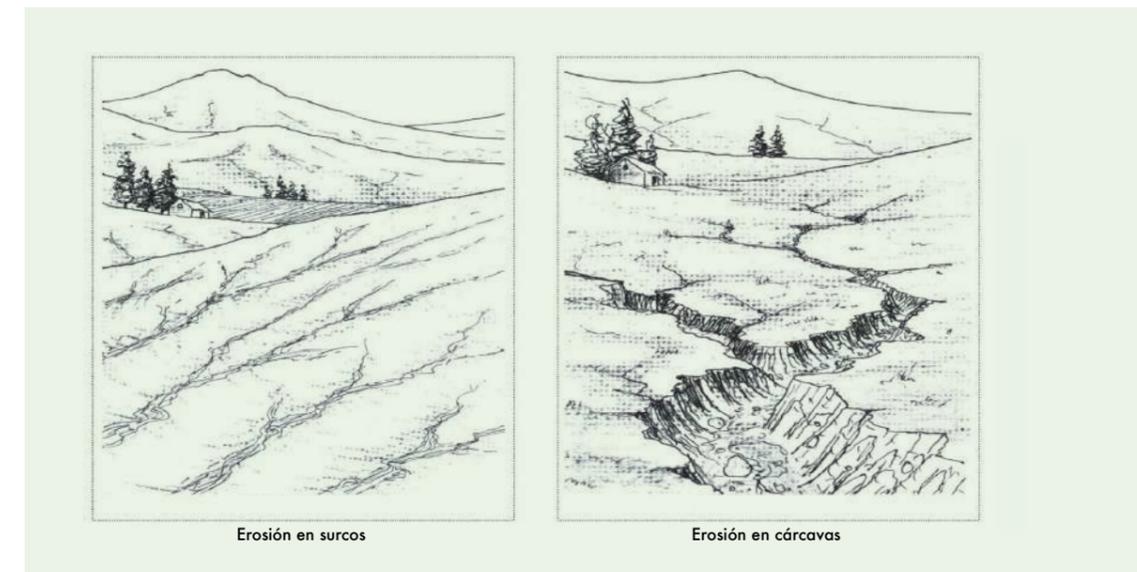
Luego de la cosecha, o en casos de sobrepastoreo de los recursos forrajeros, el suelo puede quedar descubierto en algunos sectores o durante algunos períodos de tiempo, y esto hace que quede expuesto a la erosión provocada por el viento y el agua. Cuando el suelo está "desnudo", el viento se lleva las partículas de la capa más superficial, que suele ser la más fértil, y eso hace que "adelgace".

Además, las gotas de lluvia golpean en el suelo de manera más fuerte, no infiltran con facilidad, se acumulan y corren rápidamente por la superficie, arrastrando también la capa superficial del suelo y acumulando todo ese material en zonas más bajas o en los cursos de agua a los que llegan.

La pendiente del terreno puede generar pequeños ríos que, con su fuerza, generen grietas profundas en el suelo; se los denomina surcos al principio, y cuando avanzan en velocidad y distancia, cárcavas.

De esta manera, se genera un deterioro gravísimo del suelo que ha llevado entre miles y millones de años producir, y se genera un ciclo vicioso, en el que suelos más pobres generan menor cobertura, lo que provoca mayor erosión, como se observa en la Figura 26. Al caer la producción por hectárea, puede necesitarse incorporar nuevas superficies al sistema productivo, que seguramente forman parte de ecosistemas más frágiles.

Los problemas generados sobre la fertilidad física del suelo pueden controlarse con buenas prácticas agronómicas (BPA), que aseguren que el suelo permanecerá cubierto por vegetación el mayor tiempo posible, y que se realizará una adecuada elección de los cultivos que se sucederán en el lote y se evitará el sobrepastoreo.



▶ **Figura 26.** Erosión en surcos (izquierda) y en cárcavas (derecha).

Fuente: Carranza Olivera, 2013

La **secuencia de cultivos** puede influir en la dinámica de nutrientes de los suelos, sobre todo cuando se siembra cada año la misma especie.

Pérdida de nutrientes

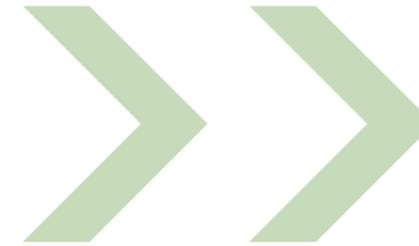


Para poder lograr un manejo integral del sistema, hay que asegurarse de que las salidas, producto de las cosechas (granos o pastoreos), sean compensadas por entradas de nutrientes y material orgánico (fertilización, abonos, deyecciones, rastrojos). En los suelos de la Argentina, desde hace años, se registra consistentemente que los aportes de nutrientes son mucho menores que las salidas. Estos balances negativos han llevado a disminuciones significativas de la dotación de nutrientes de los suelos agrícolas.

La herramienta fundamental para evitar la degradación del suelo es la fertilización balanceada con diferentes nutrientes, de acuerdo con la recomendación de un profesional. Este debe haber hecho un buen diagnóstico basado en un análisis de suelo y un cálculo de los requerimientos nutricionales del cultivo según la especie y el rendimiento esperado, estimando las necesidades de reposición para mantener el nivel de nutrientes en equilibrio.

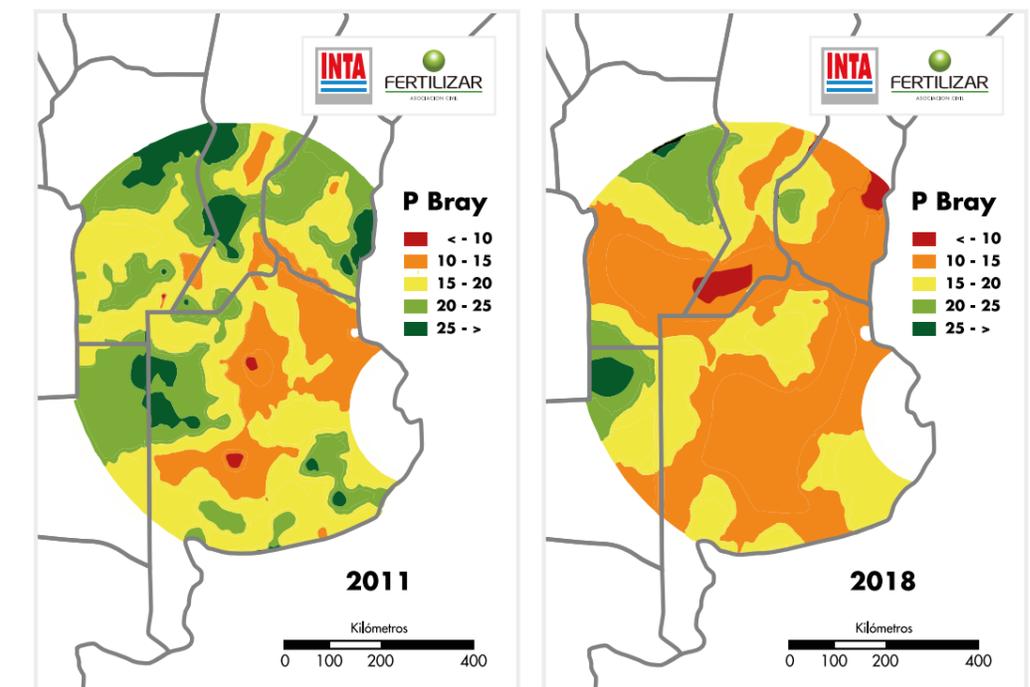
Los análisis de suelos permiten tomar las medidas necesarias para lograrlo. Cada suelo tiene su historia y sus necesidades, y es importante caracterizarlos y conocerlos para lograr su máximo potencial de rendimiento, manteniendo su productividad y su equilibrio biológico, para que también puedan aprovecharlos las próximas generaciones.

La rotación de cultivos, es decir, la secuencia de los mismos en el tiempo también puede influir en la pérdida de nutrientes de los suelos. Un lote sembrado año tras año con la misma especie vegetal irá perdiendo biodiversidad, mientras que las raíces explorarán siempre la misma sección del suelo, donde se concentrará la extracción de nutrientes. Como las especies vegetales no son igualmente demandantes de cada nutriente, algunos se agotarán más rápidamente. Así, el sistema se volverá más frágil e inestable.



Por lo tanto, con una mirada integral, se debería siempre planificar una sucesión de cultivos que incluya alternadamente gramíneas (con raíces en cabellera) y leguminosas (de raíces pivotantes y que además contribuyen con la fijación biológica de nitrógeno). Idealmente, las rotaciones agrícolas deberían incluir también pasturas perennes consociadas (mezclas de gramíneas y leguminosas), ya que duran dos o más años, manteniendo períodos de producción más permanentes que si solamente se implantan cultivos anuales. La secuencia y duración de cada especie dependerá del potencial y la estabilidad del sistema: cuanto más frágil, mayor debería ser la proporción de años destinados a pasturas.

Distribución de los niveles de P-Bray del horizonte superficial (0-20 cm) en suelos con prolongada historia agrícola muestreados en 2011 y 2018.



► **Figura 27.** Fósforo extractable en la Región Pampeana en 2011 y en 2018. Fuente: Sainz Rozas y colaboradores (2019).



► **Figura 28.** Importancia de la biodiversidad de los suelos
Fuente: FAO (2015).



La elección de una rotación correcta es un ejemplo de buena práctica de uso y manejo de los suelos agropecuarios. También permite ir controlando oportunamente la presencia de especies vegetales no deseadas (malezas) y distintos insectos y enfermedades.

Con respecto a los suelos ganaderos, donde crecen animales, además de plantas, una estrategia interesante es la distribución homogénea de las deyecciones de los animales en los lotes. Esto puede lograrse con pastoreos rotativos, en los que se van habilitando pequeños sectores de pastoreo con

alta carga de animales por un corto período (para no sobrepastorear), lo que asegura una distribución bastante uniforme de las deyecciones.

Otra estrategia es utilizar suplementos dietarios, que pueden aportar elementos como zinc, manganeso, cobre, selenio, cobalto, hierro, calcio, azufre, magnesio, fósforo y potasio. Estos suplementos se pueden esparcir bajo los alambres provisorios que delimitan las parcelas de pastoreo: los remanentes se incorporan al suelo y los nutrientes no digeridos vuelven al suelo en la bosta de los animales.

Prevención de daño ecológico. Producir eficientemente para cuidar el ambiente

La actividad humana ha permitido, sin dudas, mejoras en muchos aspectos de la vida, pero también, sin quererlo, ha introducido factores de desequilibrio en el ambiente. Algunos de los principales desafíos a los que nos enfrentamos hoy son:

- el calentamiento global, por aumento de los gases de efecto invernadero (GEI);
- la erosión hídrica y eólica del suelo, generalmente por pérdida de cobertura vegetal;
- la desertificación, como consecuencia del agotamiento o degradación de los suelos y, por ende, la pérdida de cobertura vegetal;
- la contaminación del agua por efecto de la erosión y del mal manejo de sustancias químicas y de residuos urbanos e industriales.

Todo este listado puede abordarse aplicando los conocimientos actuales e implementando buenas prácticas de manejo.

El sector agropecuario tiene la enorme responsabilidad de hacer un buen uso del suelo, ya que tiene la obligación de contribuir a sostener la vida en el planeta y corregir algunos de los desequilibrios actuales. En este sentido, hay dos grandes líneas de trabajo:

- Mantener el suelo cubierto con vegetación y adecuados niveles de materia orgánica, estimulando el secuestro de carbono atmosférico.
- Mantener y recuperar el nivel nutricional del suelo.

Un suelo cubierto de vegetación y rico en materia orgánica está protegido de la erosión hídrica y eólica, y un suelo bien nutrido es capaz de producir alimentos de alta calidad nutricional, al permitir que los materiales sembrados expresen su mayor potencial.

Obtener el máximo rendimiento por hectárea permitiría producir grandes cantidades de alimento de calidad, y así evitar aumentar la superficie destinada a la producción. Y esto, indirectamente, aliviaría la presión de explotación de nuevas áreas y ayudaría a preservar los ecosistemas naturales y las áreas de conservación de flora y fauna.

Por otra parte, alcanzar los máximos potenciales de rendimiento, lo cual implica la formación de grandes cantidades de biomasa vegetal, permitiría remover de la atmósfera grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂), uno de los principales gases de efecto invernadero. Los suelos del mundo tienen aún un gran potencial de almacenaje de este carbono absorbido por las plantas, a través de la acumulación de este elemento en cantidades crecientes de materia orgánica, contribuyendo de esta manera al control del calentamiento global.



El sector agropecuario tiene la enorme responsabilidad de hacer un buen uso del suelo, ya que tiene la obligación de contribuir a sostener la vida en el planeta.

→ Para mantener el potencial productivo del suelo, es imperativo reponer los nutrientes que las cosechas y los pastoreos exportan. Así, una nutrición adecuada contribuye a:

- ▶ asegurar una buena cobertura vegetal, previniendo la erosión;
- ▶ asegurar una alta producción por hectárea, respondiendo a las necesidades crecientes de alimentos de alta calidad nutricional;
- ▶ evitar y revertir la degradación de los suelos, manteniendo y recuperando su capacidad productiva;
- ▶ retirar de la atmósfera mayores cantidades de gases causantes del calentamiento global;
- ▶ hacer un uso eficiente del agua, que se transforma en tejidos vegetales.

La nutrición de los suelos y las plantas es clave para aumentar la productividad primaria y el secuestro de carbono, pero ¿cómo es que esos

nutrientes se transforman en tejidos vegetales y luego en materia orgánica del suelo? Esta pregunta se contesta entendiendo el ciclo del carbono y su proceso más relevante: la fotosíntesis o fijación de carbono.

Ciclo del carbono y de la materia

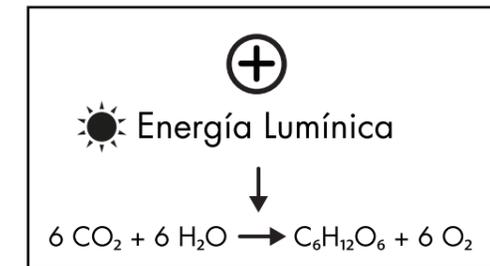
Los seres vivos son grandes reservorios de carbono; el ciclo del carbono y el ciclo de la materia están altamente relacionados. Cada vez que los vegetales captan dióxido de carbono (CO_2 , un compuesto inorgánico) para sintetizar glucosa (un compuesto orgánico) mediante el proceso llamado fotosíntesis, reservan carbono en sus tejidos. Este va pasando a lo largo de la cadena

trófica hasta finalmente ser liberado como CO_2 cuando los organismos respiran o mueren y son descompuestos. El material orgánico que compone a los seres vivos está fundamentalmente formado por largas cadenas de carbono asociado a otros elementos. Por lo tanto, al analizar el ciclo de la materia en los organismos vivos, indirectamente estamos analizando las distintas transformaciones que sufren las moléculas que contienen carbono. El proceso central de este ciclo, en el que el ser humano espera apoyarse para aumentar las entradas de carbono a los suelos, es la fotosíntesis.

→ Fotosíntesis

Las plantas, las algas verde azuladas y algunas bacterias son organismos autótrofos, es decir, son capaces de sintetizar moléculas orgánicas complejas a partir de moléculas inorgánicas simples (CO_2). Su tipo de nutrición es inorgánica, a diferencia de los heterótrofos, que se alimentan de otros organismos vivos, formados por complejas moléculas orgánicas, para poder desarrollar sus procesos vitales y sintetizar sus propios tejidos.

Las plantas sintetizan sus propias moléculas orgánicas (azúcares) a partir de carbono, hidrógeno y oxígeno que toman del aire, del agua y del suelo. La síntesis de nuevas sustancias requiere energía para romper los enlaces de las moléculas simples y luego generar enlaces nuevos entre los átomos de las nuevas moléculas. Este proceso se llama fotosíntesis, ya que se sintetizan moléculas gracias a la utilización de energía solar (luz). La fotosíntesis puede resumirse en la siguiente fórmula:



La glucosa ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) luego atraviesa distintos procesos metabólicos que dan lugar a las otras moléculas orgánicas.

Como muestra la fórmula, las plantas toman el CO_2 del aire, que reacciona, gracias a la energía solar, con el agua, y da como resultado glucosa y oxígeno. Las plantas utilizan la glucosa para formar moléculas más grandes, como el almidón, y como fuente de energía.

Por lo anterior, podemos decir que las plantas son importantes consumidores de CO_2 , que es una de las moléculas que forman parte del ciclo del carbono.

▶ **Figura 30**
Ciclo del dióxido de carbono (CO_2)
Fuente: EducarChile.cl.

Suelos manejados de forma sostenible



Quando se gestionan de forma sostenible, los suelos pueden jugar un papel importante en la mitigación del cambio climático a través del secuestro de carbono (C) y reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera.



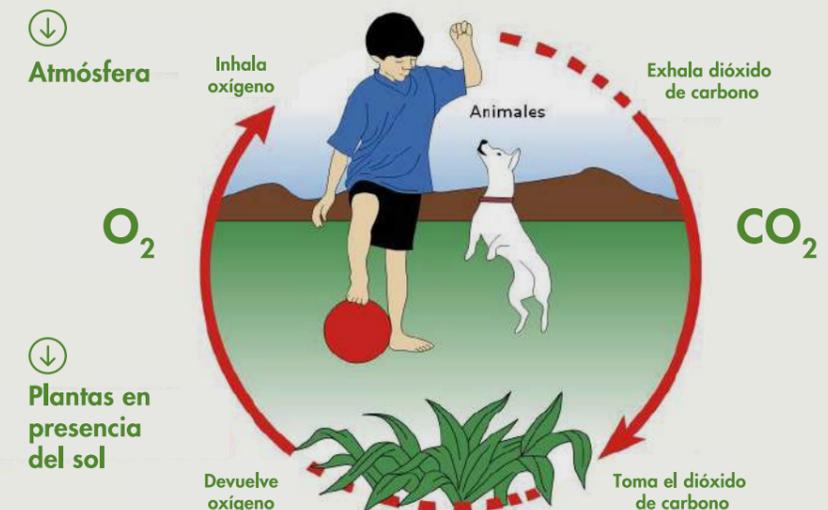
Al restaurar los suelos degradados y adoptar prácticas de conservación de suelos ...



... hay un gran potencial para disminuir la emisión de gases de efecto invernadero procedentes de la agricultura, mejorar la retención de carbono y aumentar la resiliencia frente al cambio climático.

▶ **Figura 29.**
Suelos sostenibles
Fuente: FAO (2015).

Ciclo del dióxido de carbono



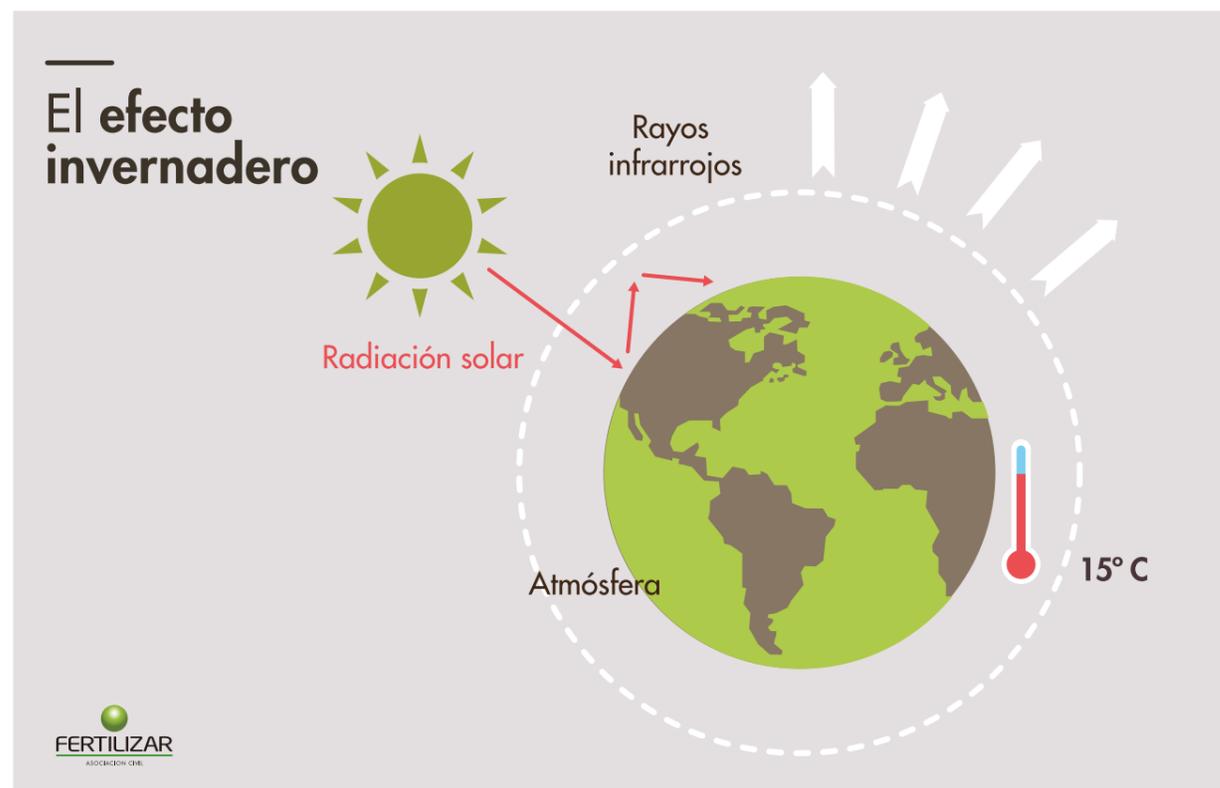
→ Fijación de carbono y cambio global

→ El dióxido de carbono (CO_2) está presente en la atmósfera en una muy baja concentración, pero se ha visto incrementado en las últimas décadas como consecuencia de la actividad humana, y es, junto con el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O), uno de los gases que producen el efecto invernadero.

El efecto invernadero es beneficioso y necesario, porque gracias a él la Tierra mantiene temperaturas aptas para la vida. El problema se produce cuando el CO_2 o los otros gases de efecto invernadero aumentan de manera

desproporcionada y generan una excesiva retención del calor, con el consecuente aumento de la temperatura del planeta.

Una de las formas de reducir el CO_2 de la atmósfera es aumentando la cobertura vegetal, es decir, transformando el CO_2 en tejidos vegetales a través del proceso de fotosíntesis. Cuanto más estables sean los tejidos vegetales, y puedan ser incorporados a los suelos, mayor contribución habrá para mitigar el cambio climático que sufre el planeta.



► **Figura 31.** Efecto invernadero
Fuente: Elaboración propia.



>. Buenas prácticas de fertilización

Surge de los capítulos anteriores que la reposición de nutrientes, cuya modalidad más operativa y difundida es la fertilización, es clave para mantener la calidad de los suelos y el potencial de generación de biomasa, la producción de alimentos y otros bienes, y la acumulación de carbono en los suelos. Para lograrlo, la fertilización debe ser responsable, es decir, debe adoptar una serie de buenas prácticas de manejo, diseñadas por especialistas. La idea que subyace en las buenas prácticas de fertilización es hacer un uso eficiente del recurso suelo, asegurando la conservación e incremento de su fertilidad.

Es importante recalcar que los fertilizantes son concentrados de nutrientes. No son tóxicos ni peligrosos para el transporte o su manipulación. De todas maneras, su uso indebido o algunas circunstancias fortuitas, como la rotura de un tanque o el vuelco de un camión que los transporta, requieren de una respuesta eficiente para evitar consecuencias negativas en la zona donde ocurrió. Para esto, todos los fertilizantes cuentan con hojas de seguridad que detallan cómo deben ser transportados y almacenados y qué debe hacerse en caso de un accidente.

 PLYWOOD ECUATORIANA S. A. HOJA DE SEGURIDAD RESINA UREA-FORMALDEHIDO CR		IDENTIFICACION
TELEFONOS DE EMERGENCIAS Central de Emergencias: 911. Bomberos: 102 Cruz Roja: 131		RESINA UREA FORMALDEHIDO
PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS <ul style="list-style-type: none"> • APARIENCIA: Líquido claro a blanco ruboso con ligero olor característico. • PUNTO DE EBULLICION (760 mm Hg): 102 °C - 92 °C. • SOLUBILIDAD EN AGUA: Soluble. 		
RIESGOS PRINCIPALES <ul style="list-style-type: none"> • CONDICIONES A EVITAR: Evitar el contacto con sustancias ácidas, Cloruro de Amonio, Sulfato de Amonio, Ácidos Minceles y Orgánicos, en general todo sal de ácido fuerte o ácido débil. Alta temperatura de almacenamiento. • PRODUCTOS DE LA DESCOMPOSICION RIESGOSA: La descomposición por combustión puede producir Monóxido y Dioxido de Carbono, Aldehidos incluido el formaldehido, cianuro de hidrógeno, partículas y otros compuestos orgánicos. 		
PELIGROS PARA LA SALUD <ul style="list-style-type: none"> • INHALACION: No se espera que sea nocivo bajo condiciones normales de uso. Sin embargo, si se permite la acumulación en el ambiente puede causar irritación de la nariz, garganta y pulmones. • INGESTION: Irritante, no se espera que sea nocivo bajo condiciones normales de uso. • OJOS: Puede causar irritación en contacto prolongado o repetido. • PIEL: Puede causar irritación en contacto prolongado o repetido. Puede causar reacciones en la piel a personas hipersensibles. • SIGNOS Y SINTOMAS DE SOBREEXPOSICIÓN: En zonas donde es alta la emisión y poseen mala ventilación, puede causar disminución respiratoria, lesiones nasales, irritación ojos y la piel. 		
ELEMENTOS DE PROTECCION PERSONAL <ul style="list-style-type: none"> • PIEL: Cuando exista riesgo de contacto con las manos use guantes de caucho. • OJOS: Use anteojos de seguridad cuando exista riesgo de salpicadura a los ojos. • RESPIRACION: Use equipo de protección respiratoria para vapores orgánicos. • PRACTICAS DE HIGIENE DE TRABAJO: Lavarse las manos con agua y jabón, luego de haber tocado el producto y antes de ingerir alimentos. No frotar los ojos con manos contaminadas. 		
MEDIOS Y MEDIDAS PARA COMBATIR EL FUEGO <ul style="list-style-type: none"> • PELIGRO DE INCENDIO Y/O EXPLOSIÓN: La resina no se incendia en estado líquido. Es combustible cuando el agua se ha evaporado. • PROCEDIMIENTOS ESPECIALES DE COMBATE DE INCENDIO: En caso de fuego, mantener frío los tanques de almacenamiento. Evacuar o aislar el área de peligro. Restringir el acceso al personal. Usar equipo de protección personal. • AGENTES DE EXTINCION DE INCENDIO: Usar agua en forma de rocío. 		
CONTROL DE DERRAMES <ul style="list-style-type: none"> • Evacuar o aislar el área de peligro. Restringir el acceso a personas innecesarias y sin la debida protección. Usar equipo de protección personal. No permitir que caiga en fuentes de agua y alcantarillas. • AISLE: El área afectada para confinar el producto derramado. • RECUPERE EL PRODUCTO: Con material absorbente como arena o tierra y colóquelo en un recipiente apropiado. 		
TRATAMIENTOS MEDICOS DE EMERGENCIA <ul style="list-style-type: none"> • INHALACION: Llevar al paciente al aire fresco. De ser necesario dar respiración artificial. Solicitar asistencia médica. • INGESTION: Lavar la boca con agua. Suministrar abundante agua. NO INDUCIR AL VOMITO, si éste se presenta inclinar a la víctima hacia adelante. Solicitar asistencia médica. • PIEL: Quite la ropa contaminada. Lavar la zona afectada con abundante agua y jabón. Lavar la ropa antes de volver a usarla. • OJOS: Lavarse inmediatamente con agua limpia durante 15 minutos. Levantar y separar los párpados para asegurar la remoción del químico. Solicitar asistencia médica de inmediato. 		
ELABORO: Jefe de Seguridad Industrial y Medio Ambiente	APROBO: Jefe de Mantenimiento	

► **Figura 32.** Ejemplo de hoja de seguridad de un fertilizante

Administración responsable de nutrientes: los 4 principios

Los especialistas han definido cuatro principios de la administración responsable de nutrientes como las 4R (del inglés *right*, "correcto"):

¿Qué son las 4R?



► **Figura 33.** Las 4R del manejo responsable de la fertilización

Fuente: Elaboración propia.

1. Fuente correcta: Este principio resalta la importancia de conocer las distintas fuentes de nutrientes. Al evaluar el tipo de ferti-

lizante que se va a usar, hay que tener en cuenta cómo va a reaccionar con el suelo; qué procesos tiene que atravesar para estar disponible para la planta; cuánto tiempo pueden llevar estos procesos dadas las condiciones de temperatura y humedad al momento de aplicación. Si se van a mezclar distintas fuentes de nutrientes, se debe considerar cuál va a ser la interacción de los distintos componentes de la mezcla y con el suelo. Además de estos aspectos técnicos, también hay que evaluar la disponibilidad de fertilizantes en el mercado local, la logística de aplicación y la posibilidad real de aplicación en el lote en cuestión.

2. Dosis correcta: Este parámetro es el más relevante en términos de respuesta de los cultivos, y está en estrecha relación con el anterior. La dosis calculada de cada nutriente va a influir directamente en la decisión de qué fuentes utilizar, ya que algunas de ellas necesitarían volúmenes inmanejables para cubrir los requerimientos del cultivo. Al determinar la dosis, se deben tomar en cuenta muchas variables e integrar conceptos. Para empezar, se necesita un diagnóstico de situación, conocer la historia del lote y las expectativas del nivel de producción.

Conviene tener una lista de preguntas al respecto, cuyas respuestas permitirán calcular y ajustar la dosis y el momento de aplicación.



Preguntas guía para calcular una correcta dosis de fertilizantes:

- ¿Cuál es la disponibilidad de nutrientes en el suelo?
- ¿Qué cultivo se va a sembrar?
¿Cuánto se espera que rinda?
- ¿Qué uso tendrá? (Cosecha de granos, pastoreo, silo).
- ¿Cuál fue el cultivo anterior? ¿Para qué se usó? (Cosecha de granos, pastoreo, silo).
¿Cómo se fertilizó? ¿Cuánto rindió?
- ¿En qué época se va a sembrar?
¿Qué condiciones meteorológicas de mediano plazo se esperan?
- ¿Existen modelos de diagnóstico validados en la zona que relacionen rendimientos con resultados analíticos de los nutrientes?



Para realizar un diagnóstico apropiado, hay herramientas y elementos que tener en cuenta:

► **Análisis de suelo:** debe ser bien hecho y bien interpretado, considerando el momento del año en que se realizará la siembra, a fin de tener en cuenta los efectos de la humedad y la temperatura en la evolución de los nutrientes, según su ciclo. Este análisis permitirá predecir en qué momento estarán más disponibles los nutrientes aportados directamente por el suelo.

► **Evaluación del efecto del cultivo anterior:**

El cultivo antecesor presenta varios efectos a considerarse para la planificación nutricional del cultivo actual. Por un lado, todo el material vegetal muerto va a ser descompuesto por los microorganismos del suelo y aportará nutrientes. El tiempo que requieren para estar disponibles dependerá de las condiciones de humedad y temperatura. Por otro lado, los niveles y el momento de absorción de nutrientes del cultivo predecesor influirán sobre la disponibilidad residual de los mismos.

► **Definición del cultivo que se va a implantar:**

Es preciso evaluar los requerimientos específicos del cultivo e incorporar al análisis el rendimiento esperado. Cuanto más alta sea la producción vegetal, mayores serán los requerimientos nutricionales. A su vez, cada cultivo es más o menos sensible a la falta de determinados nutrientes en algunos momentos de su ciclo de crecimiento, por lo tanto, puede ser necesario fraccionar dosis. También hay que considerar que siempre se producen pérdidas en el ciclo de aprovechamiento de los nutrientes.

► **Condiciones meteorológicas y predicciones para la campaña:**

No se puede esperar el mismo desarrollo del cultivo si se pronostican condiciones de humedad óptima o si se esperan condiciones de sequía, por ejemplo.

► **Rendimiento esperado y rendimiento anterior:** Con este dato se pueden estimar las salidas de nutrientes del sistema, su productividad general, y ajustar la dosis para asegurar la conservación del nivel nutricional del suelo.

3. Momento de aplicación correcto:

Este principio surge de considerar la interrelación entre distintas variables:

► **Los requerimientos nutricionales del cultivo en los distintos momentos de su crecimiento,** que variarán con el destino que se le dé, ya que no son los mismos si se utiliza para silo, pastoreo o grano, por ejemplo.

► **La disponibilidad de los nutrientes nativos en el suelo.** Es importante recordar que los nutrientes tienen que atravesar transformaciones para llegar a estar disponibles, y eso lleva tiempo. Los residuos orgánicos de cultivos anteriores (rastrajo) tienen que ser descompuestos y mineralizados justo cuando la planta lo necesita, de lo contrario, esta no podrá aprovecharlos, sea porque no se encuentran en la forma química adecuada o porque se perdieron.

► **La disponibilidad y liberación de los nutrientes aportados por los fertilizantes aplicados.**

De manera similar a lo que sucede con el material orgánico, algunas fuentes de fertilizantes requieren más transformaciones que otras para llegar a la forma química que es aprovechable por la planta. Aquí también el desfase entre el momento de aplicación, el momento en que el nutriente se vuelve disponible y el momento en que la planta lo requiere genera pérdidas e ineficiencias.

► **La probabilidad de precipitaciones,** un factor a tener muy en cuenta, porque pueden generar pérdidas por lavado o lixiviación.

► **La logística,** ya que el objetivo es optimizar los recursos, evitando transitar con maquinaria en el lote más de lo necesario, para reducir el consumo de gasoil y otros gastos sin dejar

de satisfacer las necesidades nutricionales del cultivo. Aunque muchas veces las labores se terminan realizando cuando el responsable del trabajo está disponible o cuando el clima lo permite, lo que puede no coincidir con el momento óptimo planificado, la aplicación de nutrientes debe responder a un intervalo de tiempo donde es óptima su aplicación.

4. Ubicación correcta: Este principio implica conocer la dinámica de los nutrientes en el suelo, su movilidad, el crecimiento de las raíces y su capacidad de captarlos. La maquinaria agrícola nos permite ubicar los nutrientes en la superficie del suelo o unos centímetros por debajo, ya sea junto a la semilla o al costado. También pueden hacerse aplicaciones foliares, en las que los nutrientes no son captados por las raíces sino por las hojas. La elección de la ubicación tendrá que ver con la fuente del nutriente, el tipo de nutriente, el cultivo, el momento de aplicación y la maquinaria disponible.

La consideración de las 4R muestra que el uso responsable de fertilizantes está muy lejos de ser una tarea repetitiva o intuitiva. Requiere un conocimiento cabal de la fisiología de los cultivos, de los ciclos de los nutrientes y de la dinámica del suelo. Este uso implica planificación y capacidad de adaptación a los permanentes cambios que se dan en una actividad que se realiza a la intemperie y con organismos vivos.

El asesoramiento de profesionales idóneos, que tendrán en cuenta todos estos principios, permitirá encontrar el equilibrio entre las necesidades de optimizar recursos económicos, alcanzar altos rendimientos, obtener alimentos de alta calidad nutricional, hacer un uso eficiente del suelo y del agua, y mantener la salud nutricional de los suelos.



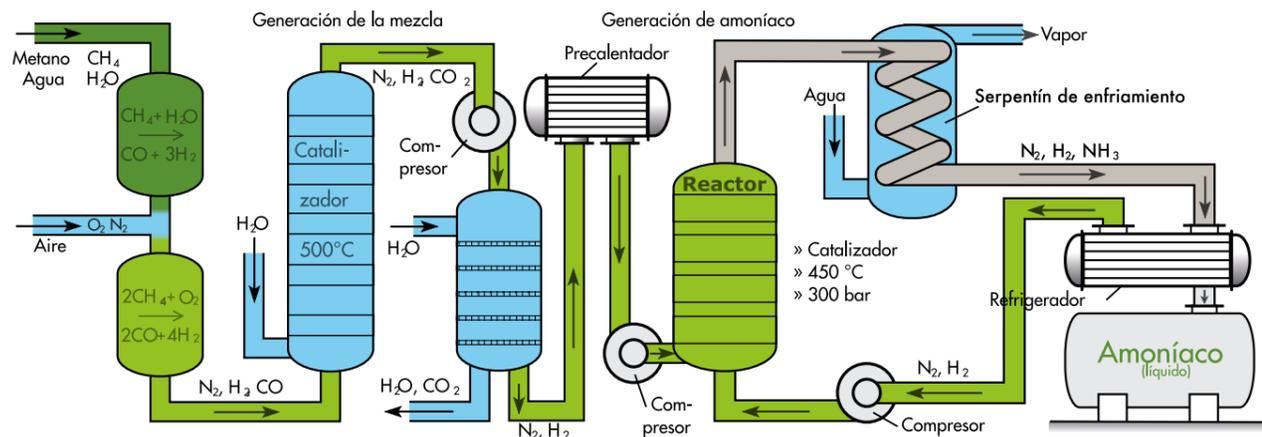
→ Consideraciones sobre la fertilización con distintos nutrientes

En los suelos productivos, donde se siembra y cosecha o los animales pastorean, se da una importante pérdida de nutrientes por exportación. Esta pérdida puede y debe ser compensada con fertilizantes. Al fertilizar adecuadamente, nos aseguramos de que el suelo mantenga un buen nivel de nutrientes, lo que permite que las plantas alcancen su máximo potencial de rendimiento, usen eficientemente el agua disponible y provean alimentos más nutritivos.

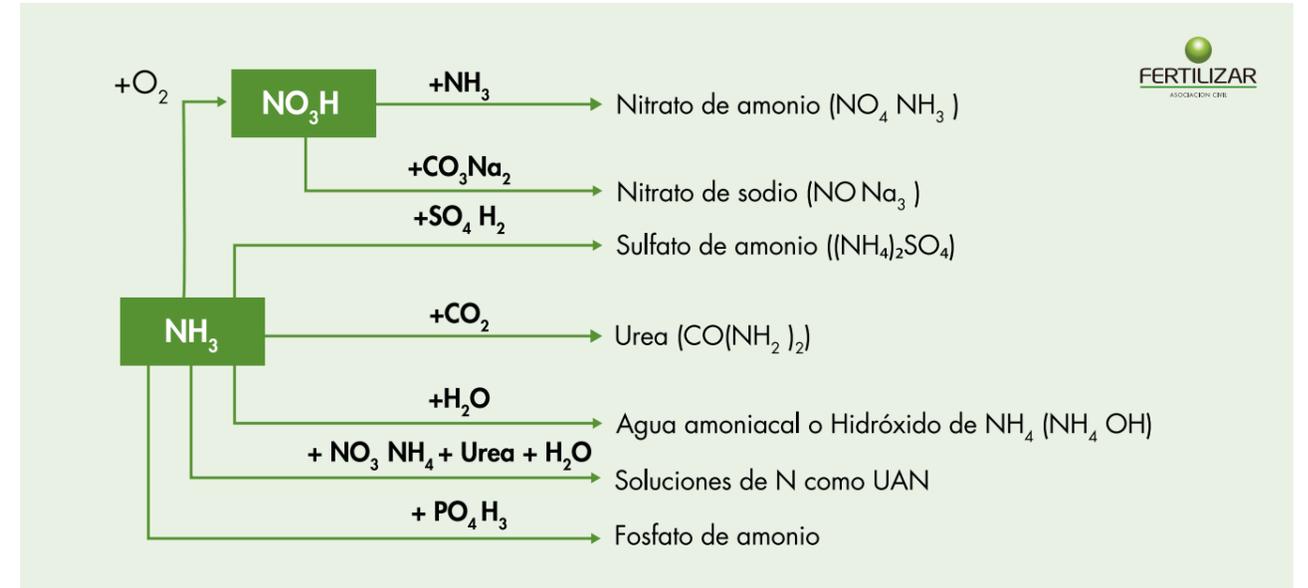
→ Fertilizantes nitrogenados

Alrededor del 95% de los materiales que se utilizan para agregar nitrógeno a los suelos agrícolas son inorgánicos. Estos fertilizantes se obtienen a través de un proceso industrial que transforma el nitrógeno atmosférico (N_2) en amoníaco (NH_3), denominado Haber-Bosch, como ilustra la Figura 34. Luego, el amoníaco obtenido puede ser transformado en distintos fertilizantes, como el nitrato de amonio (NO_3NH_4), el fosfato de amonio ($NH_4H_2PO_4$), el sulfato de amonio ($(NH_4)_2SO_4$) y la urea ($CO(NH_2)_2$). Como se ve en las fórmulas, el fosfato de amonio y el sulfato de amonio también aportan fósforo (P) y azufre (S), respectivamente.

Proceso de producción del amoníaco



► Figura 34. Proceso de obtención de fertilizantes nitrogenados



► Figura 35. Fertilizantes nitrogenados a partir del amoníaco. Fuente: Elaboración propia.

El invento que permitió hacer "pan del aire"

Hace 100 años, dos químicos alemanes, Fritz Haber y Carl Bosch, encontraron una manera de utilizar el nitrógeno del aire para producir amoníaco, con el que hoy se fabrican fertilizantes fundamentales para la alta producción de cultivos. Haber fue el que ideó el proceso, mientras que Bosch logró replicarlo a nivel industrial. Con la fertilización con nitrógeno del aire se logró aumentar la producción de cultivos sin necesidad de incorporar nuevas tierras. De allí la expresión en alemán *Brot aus Luft*, "pan del aire". Sin el aporte de Haber-Bosch, casi la mitad de la población del mundo no estaría viva hoy. Ambos recibieron el Premio Nobel en 1918.

En las figuras 34 y 35 pueden verse las reacciones químicas que permiten la obtención de los principales fertilizantes amoniacales y la variedad de fertilizantes nitrogenados.

Como no todos los fertilizantes contienen las mismas concentraciones porcentuales de nutrientes, por convención la primera cifra representa el contenido porcentual de nitrógeno (N), la segunda, de fósforo (P) y la tercera, de potasio (K), los tres macronutrientes. Si aparece una cuarta cifra, corresponde al porcentaje de azufre (S). Estos valores se refieren a los contenidos expresados para el nitrógeno como N (atómico), fósforo como P_2O_5 y potasio como K_2O . Estos datos son importantes para poder calcular realmente cuántos kilos de cada nutriente se agregan al fertilizar.



El **uso responsable de fertilizantes** requiere un conocimiento cabal de la fisiología de los cultivos, los ciclos de los nutrientes y la dinámica del suelo. Implica planificación y capacidad de adaptación.

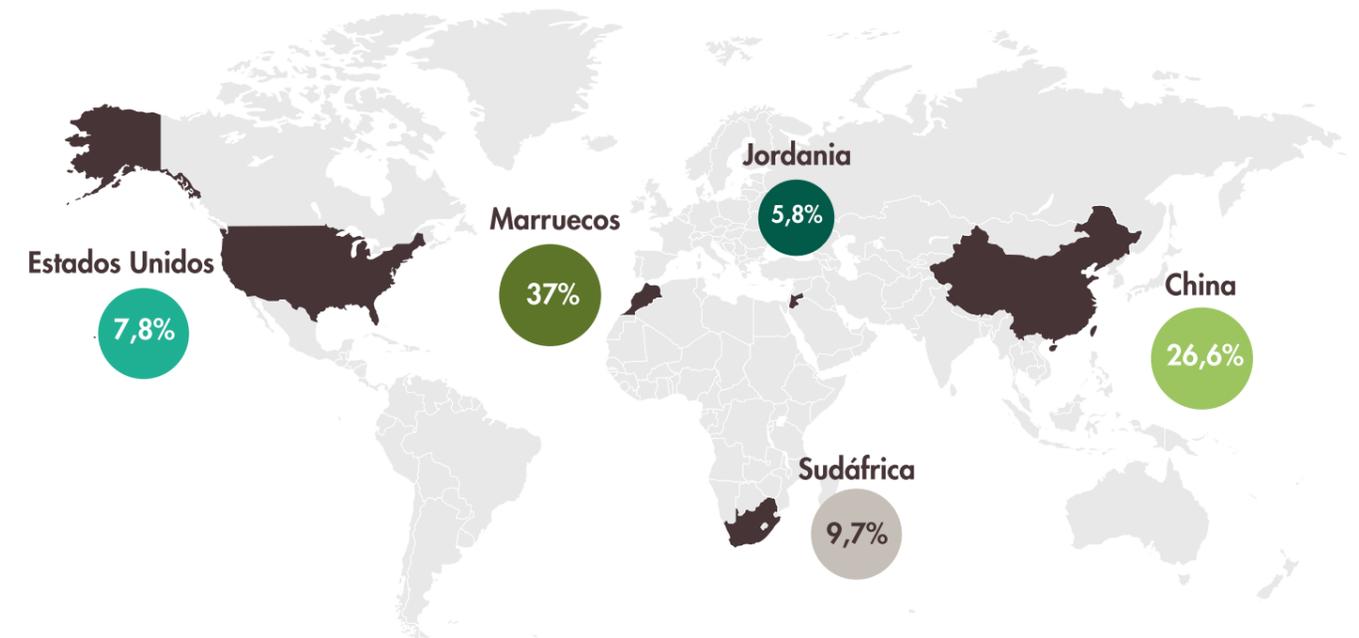
Fertilizantes nitrogenados

	% de N
a) AMONIACALES	
Amoníaco anhidro (gas)	82
Soluciones de N/Agua amoniacal	21-49
Urea	46
Sulfato de amonio	21
Fosfato diamónico	18-21
Fosfato monoamónico	11
b) NITRADOS	
Nitrato de sodio	16
Nitrato de calcio	15
Nitrato de potasio	13
c) NITRO-AMONIACALES	
Nitrato de amonio	31-34
UAN (Nitrato de amonio + Urea)	30
CAN (Nitrato de amonio calcáreo)	27
Sulfonitrato de amonio	26
d) COMPUESTOS DE LIBERACIÓN LENTA	
Urea formaldehído	38
Urea recubierta con azufre	39



▶ **Figura 36.** Fertilizantes nitrogenados.

Fuente: Elaboración propia.



▶ **Figura 37.** Reservas de fósforo en el mundo.

Fuente: Rosemarin y col., 2009.

→ Fertilización fosfatada

Para reponer el fósforo que extrajeron del suelo las actividades productivas, es preciso recurrir a la fertilización. Los fertilizantes fosfatados se obtienen de un material base llamado roca fosfórica (RF) que se encuentra en yacimientos naturales en algunas partes del planeta (ver Figura 37), como Estados Unidos, Marruecos, Togo, Rusia, Jordania, China y Oceanía. Los fertilizantes que aportan fósforo provienen de rocas con alto contenido de este nutriente, molidas y acondicionadas para poder ser incorporadas en el terreno.

La roca fosfórica puede molerse y aplicarse directamente al suelo, con lo que irá liberando fósforo lentamente. Pero también puede

tratarse con ácidos que la vuelven más soluble, lo que permite aplicar volúmenes menores y lograr disponibilidad en menor tiempo; estos son los fertilizantes fosfatados. Los más utilizados son el fosfato monoamónico (11-52-0), el fosfato diamónico (18-46-0), el superfosfato simple (0-21-0-12) y el superfosfato triple (0-46-0).

A la hora de decidir la fertilización con fósforo, hay muchos factores para tener en cuenta. Entre ellos, el nivel de fósforo en el suelo, el pH y el tipo de arcillas que predominan, relacionados con la posibilidad de que el fósforo se encuentre o no disponible. Además, el tipo de raíces del cultivo, la época de siembra y la profundidad intervienen con la posibilidad de las raíces de encontrarse con el fósforo disponible. La humedad, la aireación, la temperatura y el



→ contenido de otros nutrientes influyen en la velocidad con que puede liberarse fósforo del material orgánico en el suelo, y la velocidad con que van a crecer las raíces y poder ir tomando el fósforo. Al contrario del nitrógeno, que se mueve fácilmente en el suelo, el fósforo es de baja movilidad. Por lo tanto, es importante que esté disponible en la zona cercana a las raíces. Por esto se recomienda que, al fertilizar, se use alguna herramienta que lo ubique cerca de la zona que van a explorar las raíces (incorporado).

→ Fertilización con azufre

Para reponer el azufre que se extrae en las cosechas, se puede usar sulfato de amonio, tiosulfato de amonio y yeso (sulfato de calcio). El yeso aporta azufre elemental, que

tiene que ser transformado por las bacterias; como esto requiere tiempo, hay que aplicarlo con anticipación. Además, la aplicación de yeso puede ser incómoda porque es un polvo fino, aunque existen formas granuladas que facilitan su aplicación.

→ Fertilización con bases: potasio y calcio

El fertilizante potásico más usado es el cloruro de potasio (KCl). Como el potasio es poco móvil, lo ideal es aplicarlo cerca de la semilla (pero no en contacto con ella, para no dañarla), de manera que, al crecer las raíces, puedan interceptarlo. Un análisis de suelo nos indicará la disponibilidad de potasio y las necesidades de fertilización.



Como en los otros nutrientes, la textura, la estructura y el pH del suelo intervienen en la disponibilidad del potasio, y deben ser tenidos en cuenta a la hora de planificar la fertilización. Para reponer el calcio que extraen las cosechas hay que recurrir a la fertilización. Una alternativa es la aplicación de materiales destinados a neutralizar la acidificación de los suelos con minerales ricos en calcio, práctica comúnmente llamada "encalado", aunque no siempre proviene de la cal: otras fuentes son el yeso, la dolomita y la calcita. Por su parte, fertilizantes fosfatados ampliamente usados, el superfosfato simple y el superfosfato triple, contienen calcio en su composición.

→ Fertilización con micronutrientes

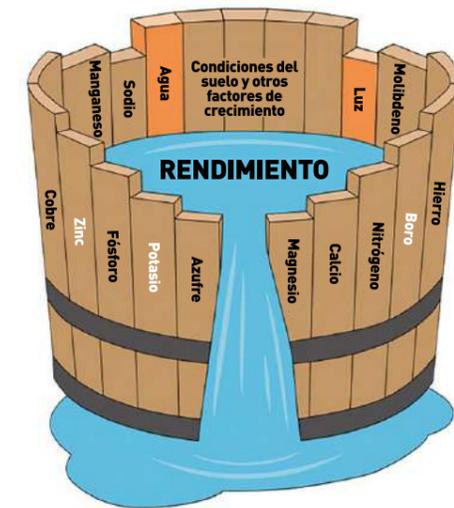
Las mejoras en los rendimientos de los cultivos y las plantas forrajeras hacen que la extracción de micronutrientes sea mayor y tenga que ser compensada mediante fertilizantes. La fertilización suele hacerse junto con la de otros macronutrientes o mediante aplicaciones foliares, de modo que no reaccionen con los componentes del suelo.

En algunos micronutrientes, la diferencia entre dosis óptima y exceso es muy pequeña, y puede incluso generar toxicidad en los animales. Por lo tanto, hay que tener cuidado al decidir la fertilización. Un ejemplo es el molibdeno, que puede resultar tóxico para los animales en pastoreo y generarles fuertes diarreas, además de deficiencias de cobre.

→ Fertilización balanceada

Es muy importante recordar que aportar un nutriente al suelo si existen deficiencias de otros limita su aprovechamiento, ya que el

desarrollo de la planta se verá restringido por el nutriente faltante. A esto se le llama "ley del mínimo": el nutriente que se encuentra en menor proporción es el que frena el proceso de crecimiento. Por ejemplo, puede pasar que no se vean respuestas esperadas al agregado de nitrógeno o fósforo, pero que, al incorporar potasio, se den saltos importantes en el rendimiento. Esto mostraría que las plantas no podían aprovechar el nitrógeno y el fósforo porque no tenían potasio suficiente para realizar las funciones de crecimiento. Por esto, la fertilización debe ser balanceada, teniendo en cuenta la necesidad y disponibilidad de todos los nutrientes.



► **Figura 38.** Representación conceptual de la Ley del Mínimo de Liebig

El barril de Liebig

Justus von Liebig fue un químico alemán que aplicó sus conocimientos al campo de la biología y la agricultura, y es considerado padre de la industria de fertilizantes. Su Ley del Mínimo, que supone que la disponibilidad del nutriente más abundante en el suelo es como la del menos abundante, se expandió y se utiliza para explicar diversos ecosistemas. Para explicar el concepto, como se observa en la Figura 38, se valió de la metáfora del barril, en el que la duela (tabla) más corta es la que pone el límite al nivel del líquido que puede contener.



La producción agropecuaria sostenible solo es posible con la mirada y la atención puestas en la salud del suelo.

Producción sostenible y fertilización

Suele hablarse mucho de producción sostenible, en relación con el concepto de desarrollo sustentable, definido de la siguiente manera: "Es el proceso mediante el cual se satisfacen las necesidades económicas, sociales, de diversidad cultural y de un medio ambiente sano de la actual generación, sin poner en riesgo la satisfacción de las mismas a las generaciones futuras. O sea, se tienen en cuenta las tres esferas del desarrollo: social, natural y económica" (UNESCO, 2012).

De acuerdo con esta definición y con los pilares fundamentales del desarrollo económico y social y la protección del ambiente, y teniendo en cuenta los ciclos de nutrientes y la dinámica del suelo, es evidente que la producción agropecuaria sostenible solo es posible con la mirada y la atención puestas en la salud del suelo. Para que no se comprometa la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades, es imprescindible reponer los nutrientes que tomamos del suelo, y para esto,

la principal herramienta es la fertilización balanceada adecuadamente planificada y aplicada.

De la misma manera, todos los involucrados en la producción agropecuaria deben extremar los esfuerzos para evitar algunas situaciones que podrían poner en riesgo el ambiente.

Entre los procesos ambientales negativos más importantes relacionados con el uso inadecuado de fertilizantes se encuentran el lavado profundo de nitratos hacia aguas subterráneas, la pérdida de óxidos de nitrógeno a la atmósfera y la contaminación de lagunas y ríos con fosfatos. Estos problemas pueden ser causados, por ejemplo, al utilizar un tipo de fertilizante inadecuado para el lugar, al aplicarlo fuera de los momentos convenientes o de demanda de las plantas, al agregar dosis muy elevadas, etc. Para evitar los daños ambientales, es preciso respetar algunas pautas de manejo responsable.





→ Contaminación de aguas subterráneas con nitratos

Como se ha señalado, el nitrógeno es muy móvil en el suelo y fácilmente puede perderse "lavándose" (yendo hacia abajo en el perfil), hasta llegar a las napas, aguas subterráneas o acuíferos. Estas son zonas más o menos profundas, con agua que puede desembocar en un arroyo, río o laguna. Cuando la napa está muy alta, las raíces de algunas plantas pueden llegar a tomar agua directamente de ella, pero todo lo que penetre en el suelo y avance en profundidad puede llegar a la napa y contaminarla.

Algunas fuentes habituales de contaminación de napas son los pozos ciegos que se hacen junto a las casas, los fluidos de basurales que van penetrando en el suelo y, en el caso específico de la producción agropecuaria, cuando se usan dosis excesivas de fertilizantes nitrogenados, los nitratos. Estos pueden provenir de los fertilizantes agregados, de la mineralización del nitrógeno en la materia orgánica y los rastrojos, de los excrementos de los animales, de los aportes de las leguminosas anteriores y de la fijación biológica de nitrógeno, es decir, de todas las formas de reposición o provisión de nitrógeno.

En general, la mejor manera de controlar el riesgo de movimientos de nitratos a las

napas es aplicar dosis adecuadas de fertilizante nitrogenado, sincronizadas con el crecimiento vegetal. Los cultivos son grandes consumidores de nitrógeno, por lo tanto, cuanto mayor desarrollo tenga el cultivo, menores serán las posibilidades de que el nitrógeno no sea utilizado. También se puede dividir la dosis y aplicar en distintos momentos, por ejemplo: una dosis baja en la siembra y una más alta cuando el cultivo ya tiene un sistema radicular bien desarrollado y puede tomar más rápidamente mayor cantidad de nitrógeno, para asegurar que todo sea aprovechado por las raíces y así aumentar la eficiencia en el uso del fertilizante y de los recursos económicos.

El uso de fertilizantes de eficiencia mejorada con inhibidores de la ureasa (para urea) o de la nitrificación (todos los fertilizantes amoniacales) puede limitar las pérdidas bajo condiciones predisponentes. Otra herramienta para evitar excesos de nitratos que puedan moverse hacia la napa es usar cultivos de cobertura, es decir, cultivos que no se cosechan, especialmente luego de un cultivo que fue fertilizado con una dosis alta de nitrógeno esperando altos rindes, que por razones climáticas no se lograron; por lo tanto, el nitrógeno que no fue absorbido por las raíces queda en el suelo con riesgo de "lavarse" cuando llueva. El cultivo de cobertura implantado rápidamente después de la cosecha podrá aprovechar ese nitrógeno y evitar que contamine la napa.

Como el **fósforo** es un nutriente muy poco móvil en el suelo, el riesgo de que contamine las napas es de baja probabilidad.

→ Emisiones de óxidos de nitrógeno a la atmósfera

Los óxidos de nitrógeno, particularmente el óxido nitroso (N_2O), están entre los gases de efecto invernadero cuyo exceso produce un aumento de la temperatura de la atmósfera. Durante el ciclo del nitrógeno se producen naturalmente óxidos de nitrógeno como resultado de dos procesos: la desnitrificación, que ocurre en condiciones de anegamiento, y por nitrificación, que ocurre en condiciones de aireación normales. La sugerencia para evitar estas pérdidas es no usar altas dosis de fertilizantes nitrogenados en suelos anegadizos. Para disminuir las pérdidas por nitrificación se pueden usar inhibidores que hacen este proceso más gradual, limitando las pérdidas. Esto es más importante en condiciones de alta temperatura, que es cuando la nitrificación es más rápida. De cualquier manera, las emisiones de óxido nitroso por desnitrificación son más relevantes que las producidas por nitrificación.

→ Acumulación de fosfatos en lagunas y ríos

Como el fósforo es un nutriente muy poco móvil en el suelo, el riesgo de que contamine las napas es de baja probabilidad. Solo podría llegar a los cursos de agua ubicados en las partes bajas del terreno si es arrastrado vía escorrentía junto con las partículas superficiales del suelo.

El exceso de fósforo en los lagos, lagunas y ríos puede producir un proceso de eutrofización, que afecta el crecimiento de la flora y fauna, y hace que el agua no sea apta para consumo. Para evitar la presencia de fósforo agregado en las partículas superficiales, se recomienda aplicarlo en profundidad, incorporándolo al suelo.

>. Consideraciones finales

Más allá del uso adecuado de fertilizantes, existen otros principios agroecológicos importantes para tener en cuenta a fin de asegurar la sostenibilidad del sistema agrario. Al hacer referencia a la producción agropecuaria como resultado de la intervención humana en un ecosistema, es preciso tener una mirada integral, que abarque la gran variedad de complejas y múltiples interrelaciones y procesos biológicos que ocurren en cada uno de los lotes.

Como regla general, debe evaluarse adecuadamente el ambiente en el que se va a trabajar o intervenir, y adaptar las decisiones agronómicas a sus posibilidades y su fragilidad, sin forzar usos para los cuales el suelo

o el ambiente no estén preparados. Una vez intervenido, es muy importante el monitoreo de indicadores de salud del suelo y del sistema en general, que permitan detectar en forma temprana procesos de deterioro, cuya recuperación suele ser más difícil cuanto más tiempo ocurra.

Trabajando seriamente, haciendo buenos diagnósticos, planificando los cultivos y pasturas, reconociendo los momentos de mayor demanda de nutrientes y reponiéndolos, es posible generar nuevos equilibrios en los sistemas, dando respuesta a la demanda de alimentos ricos en nutrientes, en cantidades suficientes y conservando los recursos naturales.



Debe evaluarse adecuadamente el **ambiente** en el que se va a trabajar o intervenir, y adaptar las **decisiones agronómicas** a sus posibilidades y su fragilidad.

> Anexo

Tipos de suelos en la Argentina

La Figura 39 presenta un mapa con los principales suelos de la Argentina. Utiliza una clasificación de suelos muy amplia (orden), pero que permite ver la correlación de estos con el conjunto clima-vegetación, y a la vez explica la delimitación de las clásicas regiones geográficas. Cabe destacar que el mapa es una sobresimplificación de la ubicación de los órdenes de suelos en la Argentina, y sólo se indica el orden predominante en cada región, aunque pueden encontrarse en cada una más de un orden.

Los suelos más productivos del país pertenecen al orden de los **molisoles**, llamados así porque la capa superficial oscura, profunda y fértil, es denominada "horizonte mólico". Puede verse claramente la distribución amplia de este orden en la Región Pampeana.

Asociados a los molisoles se encuentra el orden de **alfisoles**, suelos sin horizonte mólico, es decir, más pobres, de menor potencial productivo que aquellos. Los alfisoles están presentes en todo el país, pero predominan en una amplia zona del NEA argentino.

Los suelos **aridisoles** se caracterizan por existir en climas áridos, y por ello dominan gran parte del desierto patagónico y zonas cordilleranas.

Los **entisoles** son suelos que por alguna razón tienen escaso desarrollo; en la Argentina dominan en las zonas cordilleranas y regiones con altos niveles de arenas y/o pedregosidad de la región central, y en este caso el escaso desarrollo se debe al bajo nivel de precipitaciones y a la dureza del material original.

Los **vertisoles** son suelos formados en materiales

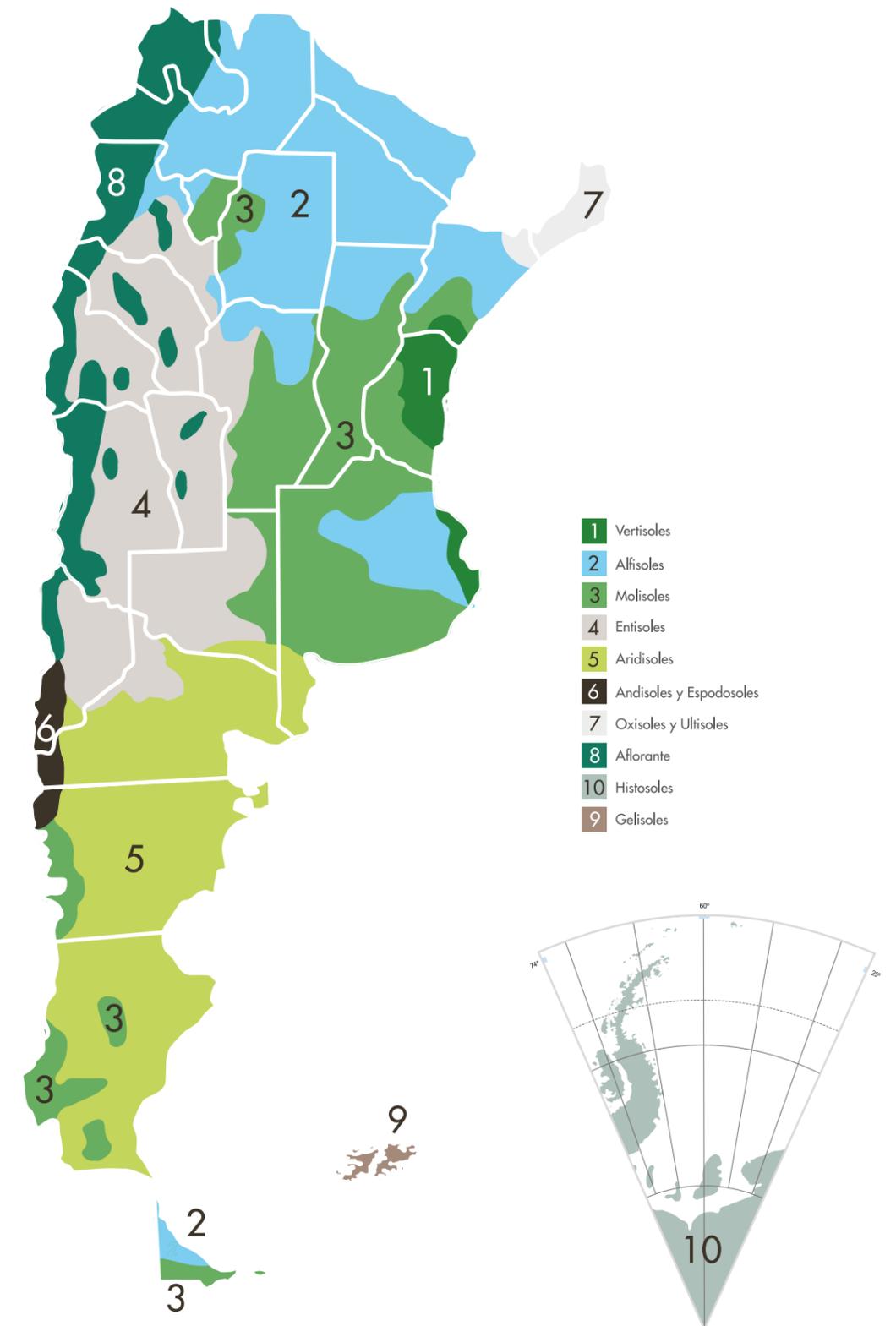
ricos en carbonatos de calcio, que derivan en suelos con muy altos niveles de un tipo de arcilla particular, que tiene la característica de expandirse y contraerse en gran medida ante cambios en la humedad del suelo; predominan en la zona central de Entre Ríos, aunque también pueden encontrarse en el litoral bonaerense cercano a Samborombón.

Los **andisoles** son suelos derivados de ceniza volcánica, y tienen la particularidad de poseer una elevada capacidad de retención de agua y elementos.

Los **espodosoles** son un tipo de suelo de escasa difusión en el país, que se caracteriza por formarse en condiciones de una extrema acidez. Ambos órdenes pueden ser encontrados solamente en algunas áreas restringidas de la cordillera de los Andes.

Los **oxisoles** y los **ultisoles** son los suelos típicos de todas las zonas tropicales del mundo, con un desarrollo en profundidad muy importante fruto de las elevadas precipitaciones, que transforman los minerales originales en compuestos oxidados de un típico color rojizo. En la Argentina, estos suelos dominan en la provincia de Misiones, y se caracterizan por su elevada acidez.

Los **histosoles** son suelos orgánicos, debido a la acumulación de agua (como en el Delta del Paraná) o por dominancia de bajas temperaturas. Cuando las condiciones de bajas temperaturas son más intensas, y el suelo llega a congelarse por períodos más o menos prolongados, los suelos que allí se encuentran se ubican en el orden de los **gelisoles**.



► **Figura 39.** Distribución de los principales órdenes de suelos en la Argentina. Fuente: Cruzate y Moscatelli (2009).

>. Índice de figuras

1. Proporciones de los principales destinos de la superficie terrestre	11	20. Participación del fósforo (P) en las moléculas de ARN y ATP	46
2. Características del suelo	15	21. Ciclo de los nutrientes básicos (NB): potasio, calcio y magnesio	48
3. Funciones del suelo	16	22. Ciclo biogeoquímico del azufre	50
4. Procesos formadores de suelos	19	23. Suelo, la base de la nutrición	52
5. Factores que inciden en la edafogénesis	20	24. Deficiencias globales de zinc en los suelos	53
6. Secuencia de suelos en una misma zona	22	25. Impacto de la compactación del suelo en las raíces	56
7. Evolución del suelo	23	26. Erosión en surcos y en cárcavas	57
8. Calicata	28	27. Fósforo extractable en la Región Pampeana en 2011 y 2018	59
9. Barreno y bolsas para muestras de suelo	28	28. Importancia de la biodiversidad de los suelos	60
10. Triángulo de clases texturales	29	29. Suelos sostenibles	62
11. Tipos de agregados	30	30. Ciclo del dióxido de carbono (CO ₂)	63
12. Valores más deseables de pH según cultivos	32	31. Efecto invernadero	64
13. Clasificación de los nutrientes principales según la cantidad que requieren las plantas	34	32. Ejemplo de hoja de seguridad de un fertilizante	66
14. Análisis de suelo en el laboratorio	36	33. Las 4R del manejo responsable de la fertilización	67
15. Proceso de transpiración de las plantas	37	34. Proceso de obtención de fertilizantes nitrogenados	70
16. Estructura de un aminoácido	40	35. Fertilizantes nitrogenados a partir del amoníaco	71
17. Ciclo del nitrógeno	43	36. Fertilizantes nitrogenados	72
18. Raíz de una leguminosa nodulada	44	37. Reservas de fósforo en el mundo	73
19. Ciclo del fósforo	45	38. Representación conceptual de la Ley del Mínimo de Liebig	75
		39. Distribución de los principales órdenes de suelos en la Argentina	83



> . Glosario

- **Actividad antrópica:** Que es o ha sido disturbado por influencia de la actividad humana.
- **Barreno:** Dispositivo para extraer muestras del suelo que se pueden enviar a analizar a un laboratorio. Esta herramienta permite realizar agujeros cilíndricos regulares en el terreno y extraer las muestras por medio de un tornillo helicoidal rotatorio o una pieza cilíndrica regular.
- **Biodiversidad:** Designa a la variedad de especies vivas que se encuentran conviviendo en un ecosistema, área o región, en un determinado momento.
- **Buenas prácticas agropecuarias (BPA):** Conjunto de prácticas que cumplen con los requerimientos necesarios para que la producción de cultivos o ganado sea eficiente, segura y amigable con el ambiente.
- **Calicata:** Pozo excavado en el suelo para su observación, usualmente de forma cuadrada o rectangular, de profundidad entre 1 y 2 metros. También puede usarse para tomar muestras de suelo.
- **Cárcava:** Incisión o hendidura estrecha y profunda, excavada por la erosión de aguas de escurrimiento superficial en suelos, especialmente en zonas con altas pendientes y pluviometrías.
- **Coloides:** (del griego *collas*: pegamento) Mezclas en las que partículas insolubles microscópicamente dispersas de una sustancia están suspendidas en otra sustancia. También son conocidos como soluciones coloidales o sistemas coloidales.
- **Desnitrificación:** Proceso bioquímico de respiración anaeróbica bacteriana, a través del cual compuestos oxidados de nitrógeno (nitratos y nitritos) son reducidos a gases como el

óxido nitroso y el nitrógeno elemental.

- **Desorción:** Proceso de liberación de un ion (previamente adsorbido) desde la superficie de las partículas arcillosas y orgánicas hacia la solución del suelo.
- **Disponibilidad:** En relación con los nutrientes, se refiere a la fracción de estos con capacidad de ser absorbidos por las raíces de las plantas.
- **Edafogénesis:** Conjunto de procesos de formación del suelo.
- **Efecto invernadero:** Fenómeno por el cual ciertos gases retienen en la atmósfera parte de la energía emitida por el suelo tras haber sido calentado por la radiación solar.
- **Erosión:** Referido al suelo, proceso de destrucción o desgaste por el agua o el viento, que lleva a perder parte o todo el horizonte superficial por transporte de partículas.
- **Estoma:** Abertura microscópica en la epidermis de las hojas de los vegetales superiores que permite el intercambio de gases y líquidos con el exterior.
- **Fertilización balanceada:** Práctica agrícola que busca aplicar a las plantas los nutrientes necesarios, y en las proporciones adecuadas, para optimizar su crecimiento y producción.
- **Fijación biológica de nitrógeno (FBN):** Proceso por el cual un grupo de bacterias puede reducir el nitrógeno elemental (N₂), presente en la atmósfera, a formas orgánicas reactivas de nitrógeno, que luego pasan a formar parte de moléculas esenciales como las proteínas.
- **Fotosíntesis:** Proceso bioquímico mediante el cual las plantas, algunas algas y las bacterias fotosintéticas convierten materia inorgánica (dióxido de carbono y agua) en materia orgánica (azúcares), aprovechando la energía proveniente de la luz solar.

- **Gramíneas:** Familia de especies que tienen flor y fruto (angiospermas), con un solo cotiledón en su embrión (monocotiledóneas). Muchos cultivos de relevancia alimentaria y económica mundial pertenecen a esta familia (trigo, cebada, maíz, arroz, pastos forrajeros, etc.). También se las denomina Poáceas (del griego *poa*: pasto, hierba).
- **Herbivoría:** Característica ecológica de determinados animales que se alimentan de las plantas.
- **Horizonte:** Cada una de las capas diferentes que tiene un suelo, fruto de sus procesos de formación (entradas, salidas, transformaciones y traslocaciones del material).
- **Inoculación:** En agronomía, práctica de impregnar semillas (especialmente de especies leguminosas) con bacterias simbiotas (que se benefician de la simbiosis) fijadoras de nitrógeno (Rizobiáceas) vivas.
- **Leguminosas:** Familia de especies dicotiledóneas (con dos cotiledones en el embrión) que tienen como fruto una legumbre, generalmente en vainas. Muchas especies cultivadas importantes pertenecen a esta familia (soja, alfalfa, arveja, poroto, entre otras).
- **Ley del mínimo:** Aplicada a la fertilidad vegetal, enuncia que el máximo rendimiento o producción de un cultivo se restringe a la disponibilidad del factor más limitante, es decir, el mínimo.
- **Lixiviación:** Movimiento descendente de partículas disueltas en el agua a través del perfil del suelo.
- **Materia orgánica:** Conjunto de partículas del suelo que tienen un origen orgánico, es decir, que derivan de la actividad o que forman parte de algún ser vivo.
- **Material parental:** Sustrato mineral original, en general no consolidado, a partir del cual se forma un suelo.
- **Meteorización:** Conjunto de procesos de degradación y resíntesis de materiales inorgánicos que ocurre en la naturaleza, que conduce a la formación de minerales secundarios, más pequeños y transformados que los minerales primarios.
- **Mineralización:** Transformación biológica de

compuestos orgánicos en compuestos minerales (inorgánicos).

- **Nitrificación:** Secuencia de pasos oxidativos que transforma el amonio en formas oxidadas de nitrógeno (nitritos y nitratos).
- **Nódulos:** Estructuras especializadas en las raíces de las leguminosas, que se inician con la infección de bacterias específicas (Rizobiáceas), y dan lugar a una estructura mixta vegetal-bacterial, donde se realiza el proceso de fijación biológica de nitrógeno (FBN).
- **Nutriente:** Cada uno de los elementos químicos que forman estructuras o cumplen determinadas funciones en las células de los organismos vivos.
- **Pasturas consociadas:** Recurso forrajero que surge de implantar mezclas de especies, típicamente gramíneas y leguminosas, que se complementan y mejoran la productividad del suelo.
- **Rastrojos:** Residuos o restos vegetales que quedan en el suelo luego de la cosecha de un cultivo.
- **Relación carbono/nitrógeno:** Relación de los elementos C y N en peso, que suele usarse para caracterizar la facilidad de mineralización del material orgánico del suelo.
- **Retranslocación:** Reubicación de los elementos nutritivos en distintos órganos, que las plantas realizan en función de las necesidades fisiológicas de cada momento.
- **Rotación:** Secuencia de cultivos de un lote o área; típicamente, la rotación se repite cada 3 o 4 años de cultivos.
- **Sobrepastoreo:** Consumo del material forrajero *in situ* que supera la capacidad fisiológica de recuperación de las especies consumidas.
- **Tierra negra:** Concepto que se usó para referirse en forma simple a suelos con altas cantidades de materia orgánica estabilizada (en inglés, *black soils*).
- **Transpiración:** Proceso por el cual el agua que se absorbe por las raíces se mueve hacia las partes superiores de las plantas por diferencias de presión, que culmina con la liberación de agua por los estomas u otras aberturas.

>. Bibliografía

- Alloway, B.J. 2008. *Zinc in Soils and Crop Nutrition*, 2da. edición. Bruselas y Paris. IZA e IFA.
- Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS). <https://sueloscr.com/importancia-del-suelo/>
- Carranza Olivera, W. 2013. "La erosión del suelo", en *Erosión*. Proyecto Jalda. <https://es.slideshare.net/slideshow/erosion-27127111/27127111>
- Ciarlo, E. 2019. "Nitrógeno del suelo", en Conti, M. y Giuffré, L. (eds.): *Edafología. Bases y aplicaciones ambientales argentinas*, 2da. edición. Buenos Aires. Editorial Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires.
- Cosentino, D. 2019. "Textura", en Conti, M. y Giuffré, L. (eds.). *Edafología. Bases y aplicaciones ambientales argentinas*, 2da. edición. Buenos Aires. Editorial Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires.
- Cruzate, G. y G. Moscatelli. 2009. *Distribución de los principales órdenes de suelos en la Argentina*. Inédito.
- De Petre, A.A., J.L. Panigatti y J.A. Ferrer. 2012. *Diccionario de términos edafológicos y otras voces asociadas*. AACCS - UNER.
- FAO. 2015. *Soil Infographics. Alianza Mundial del Suelo - Organización de las Naciones Unidas para los Alimentos y la Agricultura*. <https://www.fao.org/global-soil-partnership/resources/news/detail/en/c/284443/>. Ultimo acceso el 19/09/2024
- García, F. , L. Picone, I. Ciampitti. 2014. "Fósforo", en Echeverría, H. y F. García (eds.). *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. 2da. edición. Buenos Aires. Ediciones INTA.
- Lindbo, D., D. Malo y C. Robinson. 2021. "Soil Classification, Soil Survey and Interpretations of Soil", en Lindbo *et al.* *Know Soil, Know Life*. doi: 10.2136/2012.knowsoil
- Pereyra, F. X. 2012. Suelos de la Argentina. "Geografía de suelos, factores y procesos formadores". *Anales* N° 50. Buenos Aires. Ed. SEGEMAR-AACS-GAEA. <https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/3619>
- Rosemarin, A., G. de Bruijne, I. Caldwell. 2009. *Peak phosphorus: the next inconvenient truth*. SSWM. <http://www.thebrokenonline.eu/Articles/Peak-phosphorus> . Ultimo acceso: 19/09/2024.
- Sainz Rozas H., M. Eyherabide, G. Larrea, N. Martínez Cuesta, H. Angelini, N. Reussi Calvo y N. Wyngaard. 2019. "Relevamiento y determinación de propiedades químicas en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana", en *Actas del Simposio de Fertilidad*. Rosario.

