

EL NITRÓGENO DEL SUELO

Ing. Agr. María Florencia Benimeli; Lic. Adriana Plasencia
Ing. Agr. M.Sc. Roberto D. Corbella; Ing. Agr. Dorkas Andina Guevara
Ing. Agr. M.Sc. Agustín Sanzano; Ing. Agr. M.Sc. Francisco A. Sosa
Ing. Agr. Juan Fernández de Ullivari

1. IMPORTANCIA

El Nitrógeno (N) es un elemento esencial, considerado un macronutriente, para todos los seres vivos. Además de ser un componente específico de las proteínas, está presente en la mayor parte de las combinaciones orgánicas de los vegetales. Actualmente está demostrado que es el factor limitante más común del crecimiento de las plantas, y que un deficiente suministro de éste nutriente puede provocar notables descensos en la producción vegetal. A su vez, directa o indirectamente, es fuente de las sustancias proteicas que aseguran la nutrición del hombre y de los animales en general. Tanto sus deficiencias como sus excesos en los suelos, tienen gran impacto en la salud y en la productividad de los ecosistemas mundiales.

Más allá de que la atmósfera posee, en volumen, un 79 % de N, es un gas diatómico (N₂) muy inerte debido a su alta energía de enlace y por lo tanto es resistente a la reacción con otros elementos, que podrían generar las formas que utilizan la mayoría de las plantas. Sin embargo, existen ciertos microorganismos del suelo que realizan la fijación biológica de N desde la atmósfera y además existe un proceso de reciclado hacia el suelo de gran parte del N tomado por los vegetales en los ecosistemas naturales.

En los sistemas agrícolas, la fertilización nitrogenada suele ser una alternativa costosa, pero a menudo necesaria, para solucionar las deficiencias edáficas. Asimismo, el exceso de compuestos nitrogenados en los suelos puede degradar la calidad del ambiente. El conocimiento de los procesos, del flujo, y de cómo la actividad humana puede modificarlos, es fundamental para tomar medidas que cuiden el ambiente y permitan optimizar la producción.

2. INFLUENCIA DEL NITRÓGENO EN EL CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE LAS PLANTAS

2.1 ROLES EN LA PLANTA

El nitrógeno es un componente integral de varios compuestos esenciales de las plantas, entre los más importantes se destacan:

- Componente de los aminoácidos, que son las unidades estructurales de las proteínas.
- Componente de moléculas de enzimas, vitaminas, hormonas y ácidos nucleicos.
- Componente de la molécula de clorofila.

Además es esencial en la utilización de los carbohidratos y estimula el crecimiento y desarrollo radicular.

2.2. DEFICIENCIA

Al estar involucrado el nitrógeno en tantos procesos vitales, no es de extrañar que su deficiencia afecte en gran medida el crecimiento de la planta. Una insuficiente nutrición en N se manifiesta, en primer lugar, en una vegetación raquítica. La planta se debilita, se desarrolla poco, las hojas permanecen pequeñas, adquieren una notable rigidez y tienden a exhibir clorosis (color amarillento o verde pálido en las hojas) (Figura 1). El contenido de proteínas es bajo y el de azúcares es alto porque el nitrógeno no es suficiente para combinarse con todas las cadenas carbonadas, normalmente destinadas a formar proteínas.

El nitrógeno es bastante móvil dentro de la planta y, cuando el suministro es inadecuado, se transfiere a hojas jóvenes, provocando que las hojas vie-



Figura 1: Deficiencia de nitrógeno en cultivos de arroz. El exceso de precipitaciones resultó en la pérdida de N por desnitrificación y lixiviación. Fuente: Farmersedge.ca

Las plantas muestran clorosis, envejecen prematuramente y caen. A menudo estas plantas presentan una baja tasa de desarrollo radicular. La vegetación deficiente de N viene acompañada de una maduración acelerada del fruto y de una disminución del rendimiento.

La deficiencia de nitrógeno, sin embargo, es poco probable que se presente en suelos cultivados. Los productores suelen emplear ampliamente los fertilizantes nitrogenados, llegando incluso a abusar de los mismos con el deseo de forzar la producción sin reparar en la calidad, debido a la espectacular respuesta que muestran las plantas a la fertilización con este nutriente.

2.3. PROVISIÓN EN EXCESO

Cuando se aplica demasiado nitrógeno, ocurre un excesivo crecimiento vegetativo de las plantas; las hojas toman un color verde muy oscuro, las células de los tallos comienzan a elongarse, pero al ser débiles, el peso del ápice hace que tiendan al vuelco si se producen vientos o lluvias intensas. Altos contenidos de N aplicados pueden retardar la maduración de la planta y causar susceptibilidad a enfermedades, principalmente fúngicas, y a plagas insectiles al permanecer los tejidos durante largo tiempo verdes y tiernos. Estos problemas cobran especial importancia si otros nutrientes, como por ejemplo el Potasio, se encuentran en bajo suministro.

Además afecta la calidad de los cultivos, resultando en un color y un sabor indeseable de las frutas o bajos niveles de azúcares y vitaminas en ciertos vegetales y cultivos de raíz. La producción de flores en plantas ornamentales se ve reducida en favor de un abundante desarrollo del follaje. También puede causar la acumulación de nitratos, lo cual es perjudicial para el ganado en el caso de las pasturas y para los niños en el caso de los vegetales de hoja. El lavado del exceso de nitratos desde el suelo puede conducir a una degradación ambiental si se acumula en aguas superficiales o subterráneas.

3. ORIGEN, CONTENIDO Y FORMAS DEL NITRÓGENO EN EL SUELO

Bajo condiciones naturales, el N del suelo no proviene de la degradación de la roca madre. Todo el nitrógeno que normalmente se encuentra en él deriva, en última instancia, del que existe en la atmósfera terrestre a través de los distintos procesos de fijación, fundamentalmente de tipo biológico.

La transformación del N molecular (N_2) atmosférico en N del suelo utilizable actual o potencialmente por las plantas, se realiza principalmente según dos procesos:

1. El N puede oxidarse y pasar a la forma de óxidos, por acción de las descargas eléctricas, y estos compuestos, a su vez, trasladados al suelo por la lluvia y depositados en él como ácido nitroso (HNO_2) o nítrico (HNO_3).
2. Fijación biológica, es decir, por medio del conjunto de reacciones gracias a las cuales los organismos vivos integran el N molecular en sus estructuras como componente de diversos compuestos. Ciertos microorganismos que viven libremente en el suelo, y otros que viven simbióticamente con determinadas plantas (principalmente leguminosas), son capaces de realizar esta incorporación.

La magnitud del primer proceso, aunque no carece de importancia, es pequeña en comparación

con las cantidades de N molecular que se convierte en orgánico en virtud del segundo proceso.

La mayor parte del nitrógeno en el suelo se halla, por lo tanto, formando parte de la materia orgánica del suelo que se deposita a la muerte de los microorganismos y de las plantas que de ellos se benefician. Estas formas orgánicas quedan luego disponibles para las plantas a través de un conjunto de procesos bioquímicos, en los cuales participan activamente los microorganismos.

3.1. NITRÓGENO ORGÁNICO

El nitrógeno orgánico representa entre el 85 y el 95% del N total del suelo. Esta fracción está compuesta por 20-40% de aminoácidos, 5-10% de aminoazúcares y 1-2% de bases púricas y pirimídicas. Las restantes formas son difíciles de identificar e integran las moléculas de humus.

3.2. NITRÓGENO INORGÁNICO

Es la fracción realmente disponible para las plantas y su contenido es generalmente menor al 10% del total. Las raíces de las plantas toman el nitrógeno desde el suelo principalmente como iones disueltos de nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+).

El NO_3^- es la principal forma de absorción por las plantas. Es muy móvil en el suelo, fácil de perderse por lavado en virtud de la ausencia de mecanismos de adsorción o precipitación. Forma compuestos muy solubles.

El NH_4^+ es absorbido preferencialmente por los microorganismos y por algunos vegetales como arroz y azaleas. El NH_4^+ intercambiable no supera el 2% del N total.

En muy pequeñas cantidades y difíciles de detectar están las formas gaseosas de N:

- Óxido nitroso (N_2O)
- Óxido nítrico (NO)
- Dióxido de N (NO_2)
- Amoníaco (NH_3)
- N molecular en la atmósfera del suelo (N_2)

4. CICLO DEL NITRÓGENO

El ciclo global del nitrógeno está constituido por las interacciones de las distintas formas de N con el suelo, los organismos y la atmósfera. En las transformaciones están involucradas las formas orgánicas e inorgánicas que ocurren en forma simultánea.

La conversión de N_2 (gas) a formas utilizables por las plantas se produce principalmente a través del proceso de fijación biológica. Las formas orgánicas son convertidas a formas inorgánicas (NH_4^+ o NO_3^-) por mineralización. El NO_3^- puede volver a la atmósfera por desnitrificación en forma de N_2 o perderse por lixiviación. Las formas inorgánicas pueden ser absorbidas por las raíces de las plantas o por los microorganismos, que vuelven a incorporar el N a una forma orgánica por inmovilización (Figura 2).

5. DINÁMICA DEL NITRÓGENO EN EL SUELO

En todos los suelos, y de forma continua, existen considerables entradas y salidas de nitrógeno, acompañadas de muchas transformaciones complejas (Figura 2). Algunos de estos cambios pueden ser controlados más o menos por el hombre, mientras que otros se encuentran más allá de su control. El conjunto de todos estos procesos constituye una parte importante del ciclo general del nitrógeno en la naturaleza.

El nitrógeno presente en suelos cultivables procede de materiales diversos: restos de cultivos, abonos verdes, estiércol, fertilizantes comerciales y nitratos aportados por lluvias, así como por la fijación de N atmosférico por ciertos microorganismos.

Gran parte del nitrógeno así incorporado al suelo sufre grandes transformaciones antes de ser utilizado por los vegetales superiores. Las proteínas son degradadas, originando productos de descomposición más sencillos y, finalmente, parte del nitrógeno aparece en forma de nitrato. En esta forma puede ser apropiado tanto por los microorganismos como por las plantas superiores para construir sus estructuras proteicas, o bien ser reducido, en deter-

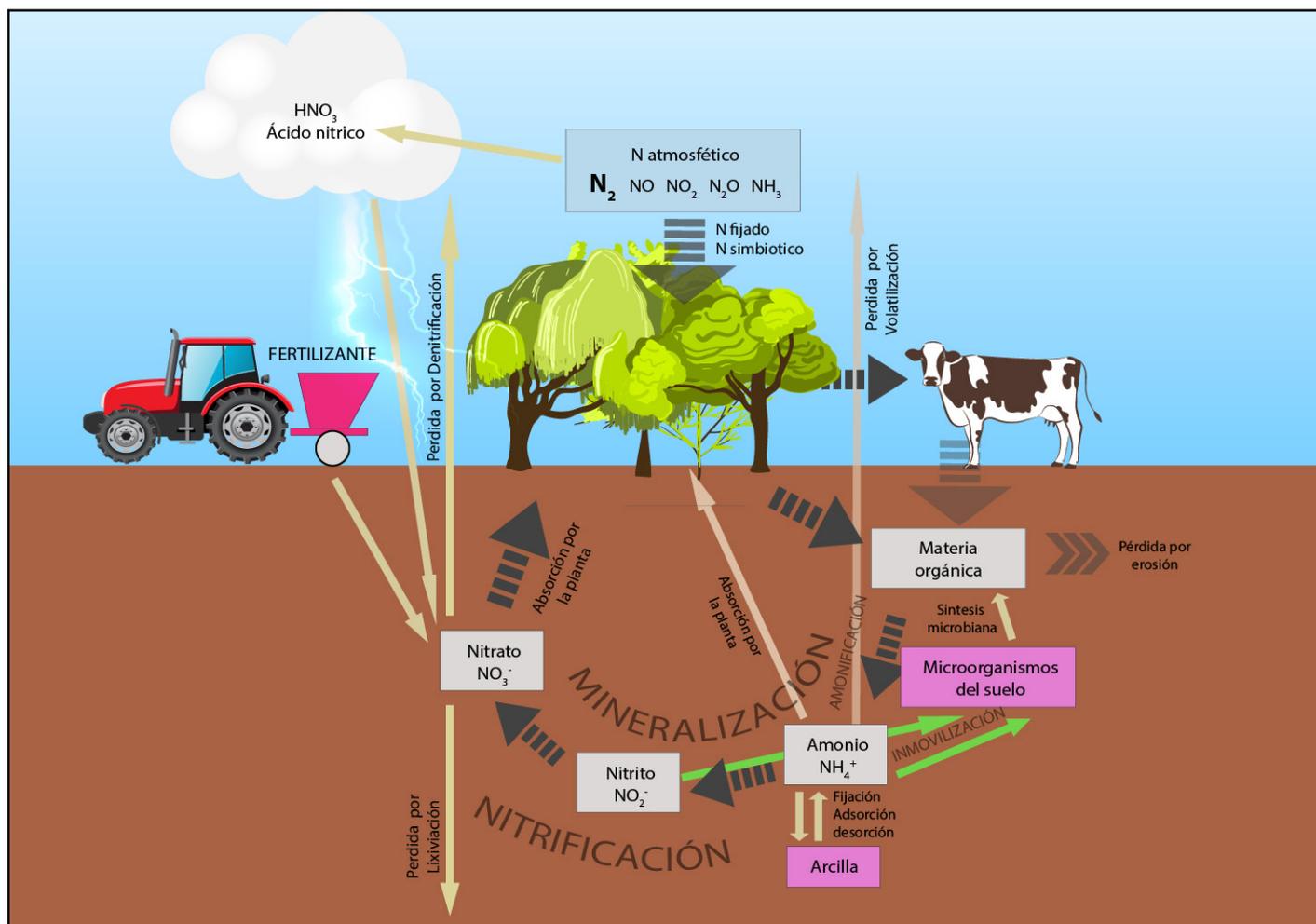


Figura 2: Ciclo del nitrógeno con énfasis en el ciclo primario (flechas grises) en el que se mineraliza el N orgánico, las plantas absorben el N mineral y finalmente, el N orgánico se devuelve al suelo como residuo vegetal o animal.

minadas condiciones, a su estado elemental.

Las pérdidas se deben a la asimilación por parte del cultivo, a la erosión, a la lixiviación y a su volatilización en condición gaseosa, tanto en forma elemental como en forma de óxidos o de amoníaco.

La dinámica del nitrógeno en el suelo está, pues, altamente influenciada por tres grandes procesos, cada uno de los cuales depende, a su vez, de un conjunto de secuencias íntimamente ligadas entre sí. La distribución de estos procesos puede resumirse en la forma siguiente:

Ganancias de N por el suelo

1. Fijación biológica de N atmosférico por microorganismos.
2. Depositiones de N desde la atmósfera.

3. Aportes de N en fertilizantes, estiércol y plantas verdes.

Transformaciones del N en el suelo

1. Aminificación, o degradación bioquímica de las proteínas y otros compuestos complejos nitrogenados en aminoácidos y aminos.
2. Amonificación, o transformación bioquímica de los aminoácidos y aminos en amonio.
3. Nitrificación, u oxidación bioquímica del amonio a nitrato.
4. Síntesis proteicas de los microorganismos del suelo, a partir de los compuestos que se originan en el transcurso de los anteriores procesos (Inmovilización o reorganización).

Pérdidas de N desde el suelo

1. Desnitrificación, o reducción bioquímica de nitratos bajo condiciones anaeróbicas.
2. Volatilización de amoníaco, principalmente en suelos alcalinos, cálidos y húmedos.
3. Lixiviación de nitratos.
4. Asimilación de nitratos por las plantas superiores- Extracción por cultivos
5. Fijación de amonio por las arcillas

6. BALANCE DE NITRÓGENO EN EL SUELO

6.1. GANANCIAS

6.1.1. FIJACIÓN BIOLÓGICA

La fijación del nitrógeno atmosférico (N_2), junto con la fotosíntesis y la respiración, se considera uno de los procesos bioquímicos más importantes en la naturaleza. Consiste en la conversión de este gas dinitrógeno inerte en N reactivo que se vuelve disponible para todas las formas de vida a través del ciclo del N. Es llevado a cabo por un número limitado de bacterias conocidas como organismos diazótrofos.

La fijación biológica de N (FBN) es una reacción de reducción que requiere energía (ATP) y la participación de la enzima nitrogenasa, presente en estos microorganismos, que cataliza la siguiente reacción:



Luego, el amonio (NH_4^+) es combinado con ácidos orgánicos para formar aminoácidos y luego proteínas. La FBN ocurre a través de sistemas microbianos que pueden o no estar, directa o indirectamente asociados con las plantas superiores.

6.1.1.1. Fijación no simbiótica

Es llevada a cabo por ciertos microorganismos de vida libre, presentes en suelos y aguas, que

no se encuentran directamente asociados con plantas superiores. En este grupo podemos encontrar:

- **Bacterias aeróbicas heterótrofas:** de los géneros *Azotobacter* y *Azospirillum* (en zonas templadas) y *Beijerinckia* (en suelos tropicales).
- **Bacterias anaeróbicas heterótrofas:** del género *Clostridium*. Estos organismos obtienen el carbono de los exudados radiculares en la rizósfera o por la descomposición saprofítica de la materia orgánica, y operan mejor cuando el nitrógeno en el suelo es limitado.
- **Bacterias fotosintéticas y cianobacterias:** especialmente en humedales y arrozales.

6.1.1.2. Fijación simbiótica con *Fabáceas* (Leguminosas)

Se produce a través de una relación de beneficio mutuo entre algunas plantas de la familia *Fabaceae* y bacterias de los géneros *Rhizobium* y *Bradyrhizobium*. Estos organismos inducen la formación de nódulos en las raíces que servirán de sitio para la fijación de nitrógeno. La planta hospedera provee a las bacterias de carbohidratos y la bacteria, recíprocamente, provee a la planta de compuestos de N reactivos.

6.1.1.3. Fijación simbiótica con no Leguminosas

Se conocen alrededor de 200 especies pertenecientes a más de 12 géneros de plantas no Leguminosas que desarrollan nódulos para la FBN. En este grupo se encuentran actinomicetes del género *Frankia* y cianobacterias del género *Nostoc*.

También existen sistemas de fijación simbiótica no-nodular que involucran cianobacterias. Uno de ellos es el complejo *Azolla-Anabaena*, el cual puede encontrarse en ciertos arrozales de áreas tropicales y semitropicales. Otro fenómeno de fijación de N es aquel que ocurre en la rizósfera de ciertas especies de la familia *Poáceas* (Gramíneas) y otras no leguminosas y bacterias del género *Spirillum* y *Azotobacter*.

6.1.2. DEPOSICIONES DE NITRÓGENO DESDE LA ATMÓSFERA

La atmósfera contiene pequeñas cantidades de amoníaco y gases de óxidos de N liberados desde el suelo, las plantas y la combustión de petróleo y sus derivados, además de nitratos formados por las descargas eléctricas que produce la caída de rayos. Estos compuestos pueden depositarse en los suelos a través de la lluvia, nieve o polvo atmosférico. La deposición es mayor en áreas de elevada precipitación y viento proveniente de las ciudades (escapes de automóviles y actividad industrial) y áreas agrícolas de elevada concentración animal (amoníaco volatilizado desde el estiércol). Además los óxidos de N reaccionan con los radicales OH⁻ libres para formar ácido nítrico, constituyendo las “lluvias ácidas”. Las cantidades de N que ingresan al suelo de esta manera son pequeñas si se las compara con otras entradas al ciclo de este elemento.

6.1.3. APORTES DE NITRÓGENO EN FERTILIZANTES, ESTIÉRCOL, PLANTAS VERDES Y EFLUENTES DE LA INDUSTRIA

En los sistemas agrícolas, deben considerarse como importantísimos los aportes de N al suelo bajo la forma de estiércol, plantas verdes y residuos diversos (efluentes de la industria); y sobre todo los aportes de fertilizantes sintéticos. En la actualidad, se verifica una fijación industrial a gran escala a través del proceso de Harber-Bosch, que consiste en la síntesis directa del amoníaco a partir del hidrógeno y del N atmosférico a temperatura y presión altas, en presencia de catalizadores. Los iones NH₄⁺ y NO₃⁻ provenientes de los fertilizantes así fabricados, son tomados por las plantas y participan en el ciclo del N exactamente en la misma forma que los derivados de la mineralización de los residuos orgánicos u otras fuentes por los microorganismos.

6.2. TRANSFORMACIONES

La conversión de N orgánico en formas inorgánicas se denomina **mineralización**. Aunque se

trata de toda una serie de reacciones enzimáticas (Aminificación, Amonificación y Nitrificación).

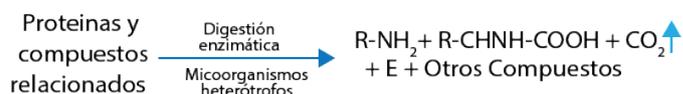
El proceso inverso se denomina **inmovilización** o Reorganización.



6.2.1. MINERALIZACIÓN

6.2.1.1. Aminificación

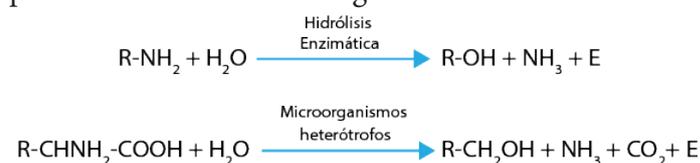
La materia nitrogenada que se deposita en el suelo de forma natural a la muerte del vegetal, junto con la añadida de otras fuentes orgánicas, no puede ser aprovechada directamente por las plantas superiores, pero sí por los microorganismos del suelo. Estos realizan una digestión enzimática en la que proteínas y compuestos relacionados son degradados a otros más simples, principalmente aminas y aminoácidos.



Las condiciones que favorecen la **aminificación** parecen ser las mismas que las que contribuyen al buen desarrollo vegetativo de la planta, en lo que concierne a la temperatura, humedad y aireación del suelo. Es muy conveniente un drenaje adecuado del suelo y la presencia de calcio, ya que las bacterias degradadoras son en gran parte aerobias y no proliferan en medio ácido.

6.2.1.2. Amonificación

El nitrógeno de las aminas y aminoácidos así liberado, puede tener dos destinos: ser utilizado por diversos microorganismos del suelo para construir sus propias estructuras o ser transformado por otros en productos simples, casi siempre en forma de compuestos amónicos como sigue:



Una amplia gama de bacterias, hongos y actinomicetes pueden llevar a cabo la **amonificación** en condiciones aeróbicas y anaeróbicas, por lo que no requiere microorganismos especializados.

El N amoniacal producido en esta etapa puede tener varios destinos:

- Volatilizarse.
- Ser absorbido directamente por las plantas superiores.
- Ser utilizado por algunos de los mismos organismos amonificantes para su síntesis proteica.
- Ser fijado por ciertas arcillas (como las Illitas).
- Ser oxidado por otras formas bacterianas (nitrificación).

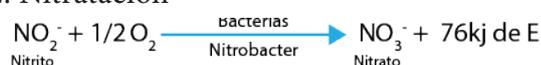
6.2.1.3. Nitrificación

Los iones amonio liberados en el proceso de amonificación pueden ser oxidados enzimáticamente por un conjunto de bacterias autótrofas del suelo, cediendo primero nitritos y luego nitratos. Este proceso denominado **nitrificación** es llevado a cabo secuencialmente por un primer grupo específico de bacterias autótrofas (*Nitrosomonas*) que convierte el amonio en nitrito (nitritación), el que inmediatamente es atacado por un segundo grupo de bacterias autótrofas (*Nitrobacter*) para convertir el nitrito en nitrato (nitratación).

Paso 1: Nitritación



Paso 2: Nitratación



Las bacterias nitrificantes se encuentran en casi todos los suelos pero son muy sensibles a condiciones ambientales extremas. Los principales factores que afectan a la nitrificación son:

1. **Contenido de amonio:** al ser el NH_4^+ el sustrato para las bacterias nitrificantes, el suministro de este ión es el requerimiento esencial para la nitrificación. Sin embargo su exceso puede ser tóxico

para *Nitrobacter*.

2. **Reacción química del suelo y presencia de diversos elementos esenciales:** una reacción cercana a la neutralidad es la más favorable para las bacterias nitrificantes y son muy sensibles a bajo pH. Los límites de pH entre los que la nitrificación tiene lugar se sitúan entre 5,5 y 8, con un óptimo entre 6,9 y 7,5. La nitrificación se produce más rápidamente donde existe abundancia de Ca^{++} y Mg^{++} intercambiables y donde los niveles de nutrientes son óptimos para el crecimiento de las plantas superiores.
3. **Aireación del suelo:** las bacterias nitrificantes al ser microorganismos aerobios típicos, necesitan oxígeno molecular para producir nitratos, por lo tanto se ven favorecidos en suelos bien drenados.
4. **Humedad del suelo:** la nitrificación tiende a disminuir tanto en condiciones de excesiva humedad, como en aquellas de escasez. La humedad óptima es aproximadamente la misma que para la mayoría de las plantas, es decir, alrededor del 60% del espacio poroso con agua.
5. **Temperatura:** la temperatura más favorable para el proceso de nitrificación se sitúa entre 27 y 30°C y disminuye su velocidad e intensidad a medida que los suelos se enfrían. A temperaturas de 0°C o inferiores la nitrificación no se produce.

6.2.2. INMOVILIZACIÓN O REORGANIZACIÓN

Es el proceso opuesto a la mineralización y consiste en la conversión de iones inorgánicos (NH_4^+ y NO_3^-) a formas orgánicas. Ocurre cuando los microorganismos que se encuentran descomponiendo residuos orgánicos requieren más N del que pueden obtener de esos residuos que se encuentran metabolizando. Entonces toman iones NH_4^+ y NO_3^- de la solución del suelo para incorporarlos a sus componentes celulares, como proteínas, dejándola desprovista de N mineral esencial, efecto que se conoce como “depresión de nitratos”.

Cuando estos organismos mueren, parte del N orgánico contenido en sus células puede convertirse a formas que componen el complejo húmico, y otra

des y, por tanto, con débil capacidad de intercambio catiónico, donde la adsorción y/o fijación de NH_4^+ es escasa.

6.3.3. LIXIVIACIÓN DE LOS NITRATOS

El NO_3^- es altamente soluble en agua y no es retenido por los coloides cargados negativamente, por lo que es un anión muy vulnerable a la lixiviación. Fácilmente puede descender arrastrado por el agua de percolación hacia capas más profundas, por debajo de la profundidad de absorción de las plantas.

Este proceso es más importante en suelos de textura gruesa, cuando hay alta concentración de nitratos en la solución del suelo y elevada humedad, lo que determina que al producirse precipitaciones intensas el agua se mueva verticalmente en el perfil llevando con ella los nitratos. Estas pérdidas son preocupantes por tres razones básicas:

1. Es un valioso nutriente cuya pérdida empobrece el ecosistema.
2. Estimula la acidificación de los suelos y el co-lavado de cationes tales como Ca^{++} , Mg^{++} y K^+ .
3. El movimiento de nitrato por percolación hacia aguas profundas causa varios problemas graves en la calidad del agua subterránea y de los ríos corriente abajo.

Se han reportado mayores casos de contaminación de los acuíferos en regiones agrícolas donde se hace uso muy intensivo de la fertilización nitrogenada.

6.3.4. ASIMILACIÓN POR LAS PLANTAS Y EXTRACCIÓN POR CULTIVOS

La exportación de N por cosecha de material vegetal es la principal vía de salida del nutriente en un agro sistema. El nitrógeno pasa del suelo a la planta por el proceso de asimilación y una proporción del mismo es cosechada. La cantidad de N que absorbe un cultivo depende de la producción de biomasa que logre y de la concentración de N en los distintos órganos de la planta, lo que está regulado por el ambiente, el manejo y el genotipo.

La dinámica del proceso de absorción está regulada por la producción de biomasa del cultivo. Durante las fases iniciales del proceso de crecimiento, la producción de biomasa y la absorción de N son lentas, para pasar luego a una fase exponencial de acumulación de biomasa y nitrógeno, y llegar finalmente a un plateau.

6.3.5. FIJACIÓN DE AMONIO POR ARCILLAS

Los iones NH_4^+ son atraídos por las superficies cargadas negativamente de las arcillas y el humus, donde son retenidos en forma intercambiable, disponibles para las plantas, pero parcialmente protegidos del lavado. Sin embargo, debido al tamaño particular del ión amonio, puede quedar atrapado dentro de cavidades en la estructura del cristal de arcillas 2:1 durante largos períodos de tiempo, como amonio no utilizable.

En general, esta pérdida de N no puede considerarse como definitiva para la planta. Sólo es eventual y, realmente, su significación agrícola no se considera de gran importancia.

Podría ser considerada como una pérdida de N del suelo la erosión, tanto de estas partículas sólidas minerales asociadas a los iones amonio como así también la de los materiales orgánicos presentes en los suelos.

7. EL NITRÓGENO Y EL AMBIENTE NATURAL

7.1. IMPACTO DE LA LIXIVIACIÓN DE NITRATOS EN LA CALIDAD DEL AGUA

Los problemas en la calidad del agua a causa del nitrógeno están a menudo asociados con el movimiento del NO_3^- junto al agua de drenaje hacia aguas profundas. El nitrato puede contaminar el agua de bebida causando daños en la salud tanto de las personas como del ganado. Los nitratos también pueden eventualmente fluir subterráneamente hacia aguas superficiales como ríos y lagos.

Los factores claves en los riesgos para la salud es la concentración de NO_3^- en el agua de bebida y el

nivel de exposición (contenido de agua ingerida especialmente durante largos períodos). El nitrato en sí mismo no es directamente tóxico, pero una vez ingerido, una porción es reducida por enzimas bacterianas a NO_2^- el cual sí se considera tóxico. El efecto se manifiesta en la **methemoglobinemia**, ya que los nitritos disminuyen la capacidad de la hemoglobina de la sangre para transportar oxígeno hacia las células. La sangre con una inadecuada oxigenación es más bien azul que roja, por lo que la piel de las personas con esta condición toma un color azulado. Los niños menores de tres meses son más susceptibles y comúnmente se refiere a esta afección como “síndrome del niño azul”. Para proteger a los infantes, algunos gobiernos han establecido límites de concentración de NO_3^- en el agua de bebida.

El agua fresca rica en nutrientes (principalmente N, pero también P y Si) llevados por los ríos, estimula el crecimiento explosivo de algas, que luego se hunden hasta el fondo de los ecosistemas acuáticos cuando mueren (Figura 3). En la descomposición de estos tejidos muertos, los microorganismos agotan el oxígeno disuelto en el agua a niveles incapaces de sostener la vida animal. Peces, camarones y otras especies acuáticas emigran de la zona o mueren. Este estado de bajo nivel de oxígeno en el agua se conoce como **hipoxia** y el proceso que provoca se denomina **eutrofización**.

7.2. CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA POR DESNITRIFICACIÓN

El gas N_2 es casi inerte y ambientalmente inofensivo, pero los óxidos de N son gases muy reactivos y tiene el potencial de causar serios daños ambientales de las siguientes formas:

1. NO y N_2O liberados a la atmósfera por desnitrificación pueden contribuir a la formación de ácido nítrico, uno de los principales componentes de la lluvia ácida.
2. Los óxidos de N gaseosos pueden reaccionar con contaminantes orgánicos volátiles para formar ozono a nivel del suelo, el mayor contaminante del



Figura 3: Proliferación de algas en un río cerca ed Chengdú, China. Foto: Feliz Andrews

- aire en el humo fotoquímico que abunda en varias áreas urbanas.
3. Cuando el NO se eleva a la atmósfera superior, contribuye al efecto invernadero por absorción de la radiación infrarroja que de otro modo escaparía al espacio.
 4. Como el N_2O es un gas de efecto invernadero, se eleva a la estratósfera y participa en reacciones que resultan en la destrucción del ozono (O_3). Este último es un gas que ayuda a proteger la Tierra de la radiación solar ultravioleta perjudicial. La mayor contribución a este problema lo produce la desnitrificación en suelos, especialmente en arrozales, humedales y suelos agrícolas fuertemente fertilizados o abonados. La ganadería intensiva también genera grandes cantidades de N_2O .

8. MANEJO PRÁCTICO DEL NITRÓGENO DEL SUELO

El manejo sustentable del N persigue alcanzar tres objetivos:



1. Mantener los contenidos de materia orgánica de los suelos para asegurar un suministro adecuado de N a largo plazo en los suelos.
2. Regular las formas de N soluble para asegurar que las necesidades de las plantas estén cubiertas.
3. Minimizar el daño ambiental por pérdidas de N del sistema suelo-planta, incluidos los nitratos y el N orgánico soluble en el agua de lavado y de escurrimiento, así como el amonio y los óxidos de N en emisiones gaseosas.

Sin embargo, la aplicación de fertilizantes usualmente resulta en una concentración mucho mayor, de iones de N solubles, de lo que las plantas y los microorganismos pueden asimilar. Esto deriva en pérdidas con sus consecuencias ambientales. Por todo esto, resulta de especial importancia evitar la aplicación de más N del que se necesita.

Una manera de reducir los contenidos de N adicionado por fertilizantes es tener en cuenta los aportes por deposiciones atmosféricas, por mineralización de la materia orgánica del suelo y la fijación biológica, considerando los fertilizantes como un complemento.

Las estrategias deberían estar dirigidas a lograr una reducción racional de las entradas de N manteniendo o mejorando los niveles de producción y la rentabilidad de las empresas agrícolas. Estos enfoques incluyen:

1. Tener en cuenta las contribuciones de N de todas las fuentes y reducir el contenido de N aplicado acorde a ello.
2. Mejorar la eficiencia con la que se utilizan fertili-

zantes y enmiendas orgánicas (formas, momentos de aplicación, división de dosis, etc).

3. Evitar metas de rendimiento excesivamente optimistas, que conducen a tasas de aplicación de fertilizantes diseñadas para satisfacer las necesidades de los cultivos, las que son mucho más altas de las que realmente ocurren la mayoría de los años.
4. Mejorar el conocimiento de la respuesta de los cultivos, que identifica la aplicación de N más baja que puede producir un beneficio óptimo.
5. Evaluar la fuente de fertilizante de acuerdo al agroecosistema, teniendo en cuenta el cultivo, el suelo (pH, textura, erosión, infiltración, etc.) y el balance hídrico.

9. BIBLIOGRAFÍA

1. ÁLVAREZ, R. coord. *et al.* 2006. *Materia orgánica: valor agronómico en suelos pampeanos*. Ed. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Buenos Aires, Argentina.
2. BRADY, N. and R. WEIL. 2002. *The Nature and Properties of Soils*. 13th Edition. Prentice Hall, New Jersey, USA.
3. CONTI, M. coord. *et al.* 1998. *Principios de edafología: con énfasis en suelos argentinos*. Orientación Gráfica Editora. Buenos Aires, Argentina.
4. FOTH, H.D. 1986. *Fundamentos de la ciencia del suelo*. Compañía Editorial Continental. D.F., México.
5. NAVARRO BLAYA S. & G. NAVARRO GARCÍA. 2003. *Química Agrícola: el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal*. Ed. Mundi Prensa. Madrid, España.

