



FACULTAD DE  
**AGRONOMIA**  
UNIVERSIDAD DE LA  
REPUBLICA

**ÀREA DE SUELOS Y AGUAS**  
**CÀTEDRA DE FERTILIDAD**

# ***NITRÓGENO***

*Ing. Agr. Carlos Perdomo(PhD). Prof. Titular*  
*Ing. Agr. Mónica Barbazán(Asistente).*  
*Revisado por: Bach. José María Durán Manzoni.*

MONTEVIDEO

URUGUAY

## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
<b>I.</b>	<b>FUENTES NATURALES DE N Y SU DISPONIBILIDAD PARA LAS PLANTAS</b>	<b>1</b>
1)	Factores que afectan el contenido total de N del suelo	3
2.	BALANCE DE N	13
<b>I.</b>	<b>MECANISMOS DE GANANCIA DE N</b>	<b>13</b>
A.	APORTE DE N CON LAS LLUVIAS	13
B.	FIJACIÓN NO SIMBIÓTICA	14
C.	FIJACIÓN SIMBIÓTICA	14
D.	FERTILIZANTES INORGÁNICOS Y ABONOS ORGÁNICOS	14
E.	MINERALIZACIÓN DE N	14
2)	Factores que afectan la tasa de mineralización	16
3)	Caminos del $\text{NH}_4^+$	17
F.	INMOVILIZACIÓN DE N	17
G.	MINERALIZACIÓN – INMOVILIZACIÓN: EFECTO NETO	18
1)	Factores que determinan el efecto neto: mineralización e inmovilización	18
2)	Relación entre el CMI y la formación de humus del suelo	21
H.	NITRIFICACIÓN	26
1)	Factores que afectan la nitrificación	27
<b>II.</b>	<b>MECANISMOS DE PÉRDIDA DE N</b>	<b>28</b>
A.	PÉRDIDAS DE N A PARTIR DE $\text{NO}_3^-$	28
B.	LIXIVIACIÓN O LAVADO	28
1)	Factores que afectan la lixiviación	30
C.	DESNITRIFICACIÓN	32
1)	Factores que afectan las pérdidas por desnitrificación	33
D.	PÉRDIDAS DE $\text{NH}_3$ POR VOLATILIZACIÓN	34
1)	Factores que afectan las pérdidas por volatilización	35
3.	CICLO DEL N EN LOS SUELOS	39
4.	FERTILIZANTES NITROGENADOS	42
<b>I.</b>	<b>FERTILIZANTES NITROGENADOS ORGÁNICOS</b>	<b>42</b>

<b>II.</b>	<b>FERTILIZANTES NITROGENADOS INORGÁNICOS</b>	<b>42</b>
A.	TRANSFORMACIONES DE LA UREA	44
B.	FERTILIZANTES AMONIACALES Y ACIDIFICACIÓN DE LOS SUELOS	45
C.	DIFERENCIAS ENTRE FUENTES	47
1)	Uso de fuentes amoniacaes	47
2)	Uso de fuentes nítricas	47
3)	Uso de fuentes mixtas	49
4)	EFICIENCIA DE USO DEL FERTILIZANTE NITROGENADO	49
5.	N EN EL CRECIMIENTO VEGETAL	50
I.	<b>FUNCIÓN DEL N EN LA PLANTA</b>	<b>50</b>
II.	<b>¿CUÁNTO N REQUIEREN LAS PLANTAS?</b>	<b>50</b>
III.	<b>FORMAS QUÍMICAS EN QUE EL N ES ABSORBIDO POR LAS PLANTAS</b>	<b>53</b>
A.	ABSORCIÓN Y ASIMILACIÓN DE $\text{NO}_3^-$	54
B.	ABSORCIÓN Y ASIMILACIÓN DE $\text{NH}_4^+$	55
IV.	<b>TRANSLOCACIÓN DE N</b>	<b>56</b>
V.	<b>EFFECTOS DEL N EN LA PLANTA</b>	<b>57</b>
A.	SÍNTOMAS DE DEFICIENCIA DE N	57
B.	COMPETENCIA POR CARBOHIDRATOS	57
1)	Efectos sobre el contenido de azúcar	58
2)	N y calidad en cebada cervecera	59
3)	N y calidad en trigo	59
4)	Relación crecimiento vegetativo- crecimiento reproductivo	59
5)	Efectos de la absorción de N como $\text{NH}_4^+$ o $\text{NO}_3^-$	61
6)	Efectos del N sobre la fructificación	61
C.	SUCULENCIA Y DUREZA	61
D.	DAÑOS POR BAJAS TEMPERATURAS	61
E.	INCIDENCIA DE ENFERMEDADES	62
F.	EFECTO DEL N SOBRE LA MADURACIÓN	62
G.	COMPETENCIA ENTRE ESPECIES	62
H.	VUELCO	63
I.	RELACIÓN GRANO/PAJA EN CEREALES	63
6.	N Y PROBLEMAS AMBIENTALES	64
I.	<b>TOXICIDAD POR <math>\text{NO}_3^-</math></b>	<b>64</b>
II.	<b>NITROSAMINAS</b>	<b>67</b>
III.	<b>EMISION DE <math>\text{N}_2\text{O}</math> Y PROBLEMAS AMBIENTALES</b>	<b>67</b>
7.	BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA	69



## 1. INTRODUCCIÓN

El nitrógeno (N) es un nutriente esencial para los seres vivos, ya que es uno de los constituyentes principales de compuestos vitales como aminoácidos, proteínas, enzimas, nucleoproteínas, ácidos nucleicos, así como también de las paredes celulares y clorofila en los vegetales.

Debido a la importancia del N en las plantas, junto al fósforo (P) y al potasio (K) se lo clasifica como macronutriente.

Es, además, el nutriente que en general más influye en el rendimiento y calidad del producto a obtener en la actividad agropecuaria.

### I. FUENTES NATURALES DE N Y SU DISPONIBILIDAD PARA LAS PLANTAS

La mayor parte del N del planeta Tierra se encuentra en las rocas ígneas de la corteza y el manto (Tabla 1). Sin embargo, esa forma de N no está disponible para las plantas, por lo menos en el mediano plazo. Por lo tanto, se puede considerar que esta forma del N no esta disponible para los seres vivos.

En la naturaleza existen dos fuentes principales de reserva de N para las plantas. La mayor es la atmósfera, en la cual el 78% del aire es N. Este N se encuentra en forma molecular ( $N_2$ ), aunque también existen otras formas gaseosas de N de mucha menor importancia cuantitativa: óxido nitroso ( $N_2O$ ), óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) y amoníaco ( $NH_3$ ). Se estima que por encima de una hectárea de suelo hay aproximadamente 300.000 ton. de N (Stevenson,1982). El aire del suelo tiene normalmente una composición similar a la atmósfera, aunque ocasionalmente puede estar más enriquecido en alguna de las otras formas gaseosas, como  $N_2O$  o  $NH_3$ , debido a la acción de procesos químicos o microbiológicos.

La otra reserva importante de N es la materia orgánica del suelo (MOS). Del total del N que hay en el suelo, aproximadamente el 98% se encuentra formando compuestos orgánicos. Dependiendo de su contenido de materia orgánica, los primeros 20 centímetros de profundidad de un suelo pueden contener entre 1.000 y 10.000 kg. de N por hectárea. Estas formas orgánicas incluyen proteínas, aminoácidos y azúcares aminados. Sin embargo, las formas químicas identificadas representan sólo un 30-35% del total del N orgánico del suelo. El resto, entre un 70 a 75% del N orgánico, está en estructuras químicas complejas que aún no se han podido identificar.

**Tabla 1. Distribución del N en los cuatro estratos de la Tierra.**

<b>Estrato</b>	<b>Tg de N</b>
Litósfera	1.636 x 10 <sup>11</sup>
Rocas ígneas	
a) corteza	1.0 x 10 <sup>9</sup>
b) manto	1.62 x 10 <sup>11</sup>
Núcleo de la tierra	1.3 x 10 <sup>8</sup>
Sedimentos fósiles	3.5 - 5.5 x 10 <sup>8</sup>
Carbón	1.0 x 10 <sup>5</sup>
Compuestos orgánicos del fondo del mar	5.4 x 10 <sup>5</sup>
Suelos	
a) materia orgánica	2.2 x 10 <sup>5</sup>
b) NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> fijado en arcillas	2.0 x 10 <sup>4</sup>
Atmósfera	3.86 x 10 <sup>9</sup>
Hidrosfera	2.3 x 10 <sup>7</sup>
Biósfera	2.8 x 10 <sup>5</sup>

Tg = terogramo = 10<sup>12</sup> o 1 millón de toneladas métricas. Estimaciones de Stevenson (1965), Burns y Hardy (1975) y Söderlund y Svensson (1976). Fuente: Stevenson, 1982.

A pesar de que el N es uno de los elementos más comunes del planeta, es también el nutriente que más frecuentemente limita la producción de los cultivos. Esto se debe a que la molécula de N<sub>2</sub> (N≡N) es inerte, con una gran estabilidad conferida por su triple enlace. El nombre de este elemento en idioma francés, “azote”, significa “sin vida”, debido a que las plantas son incapaces de asimilar N<sub>2</sub> directamente. En forma natural, el N del aire puede llegar a la planta a través de dos mecanismos principales: transferido por las bacterias que previamente lo han fijado simbiótica o asimbióticamente, o disuelto en el agua de lluvia. La cantidad de N transferido a las plantas proveniente de la fijación simbiótica es variable, del orden de 50 a 70 kg. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup>, mientras que la cantidad de N aportada por la fijación no simbiótica y las lluvias oscila entre 10 y 20 kg. ha<sup>-1</sup>. año<sup>-1</sup>.

El N presente en el suelo bajo formas orgánicas tampoco está disponible como tal para las plantas, sino que para ser absorbido tiene que pasar a formas inorgánicas. El N inorgánico representa un 2% del N total del suelo, encontrándose en formas de nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) y nitrito (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>). Estas formas inorgánicas son transitorias en el suelo, por lo cual las cantidades de N inorgánico del suelo son extremadamente variables, pudiendo existir desde unos pocos gramos hasta más de 100 kg. ha<sup>-1</sup> de N. Debido a que ésta es la forma en que el N es absorbido por las plantas, el N inorgánico es muy importante para la nutrición vegetal.

Por lo tanto, se puede decir que en la naturaleza existe una relación inversa entre la cantidad y la disponibilidad para las plantas de las distintas formas de N. Sin embargo, la baja disponibilidad del N orgánico del suelo asegura la existencia de una fuente de reserva de ese nutriente para la planta.

A diferencia del P y K, la dinámica del N en el suelo no está regulada por un equilibrio químico, sino principalmente por procesos biológicos, derivados de la actividad microbiana del suelo que afectan sobre todo a las formas minerales y a las formas orgánicas de reserva. Ejemplos de estos procesos son la mineralización, nitrificación, amonificación, desnitrificación, etc.

Debido a que la mayoría del N del suelo es orgánico, existe siempre una estrecha asociación entre los contenidos de materia orgánica del suelo (MOS) y de N total del suelo. En la discusión siguiente, se pueden considerar como sinónimos los términos MOS y N total.

## **1) Factores que afectan el contenido total de N del suelo**

### **a) Clima y vegetación**

El clima, actuando a través de la temperatura y la humedad, junto con el tipo de vegetación, determinan la cantidad de N de suelos que nunca han sido labreados.

Estudios realizados en 1930 por Jenny (citados por Stevenson, 1982), muestran la relación existente entre estas variables para transectas Norte-Sur de cuatro regiones climáticas del centro de EEUU (Figura 1). En cada región el nivel de humedad es similar, pero la temperatura media anual aumenta hacia el sur.

El efecto de la temperatura en las distintas regiones fue similar; el contenido de N de los suelos bajó entre un tercio a la mitad por cada aumento de 10 °C. Este resultado se debe a que la temperatura afecta de modo diferencial la actividad de los microorganismos y de las plantas:

- En climas donde la temperatura es baja, la actividad de los microorganismos es escasa y, por lo tanto, la velocidad de descomposición de los restos y de la materia orgánica también es muy baja. Además, la temperatura mínima para el crecimiento de las plantas es menor que para el crecimiento de los microorganismos. Por lo tanto, con temperaturas bajas se reciente más la actividad microbiana que la actividad fotosintética de las plantas.
- Al aumentar la temperatura, como sucede al acercarse a la región tropical, la actividad microbiana aumenta más rápidamente que la actividad fotosintética de las plantas. En casos extremos, como ocurre en algunos suelos tropicales de selva, prácticamente todo el N del sistema suelo-planta está formando parte de tejidos vivos, ya que los restos frescos que caen sobre la superficie sufren una rápida transformación. Como resultado, estos suelos acumulan poca materia orgánica.

Por otra parte, al aumentar la humedad de los suelos, aumenta la velocidad de crecimiento vegetal, y con esto la tasa de producción de materia seca. Por esto, cuando se compara el contenido de N del suelo de las distintas regiones, se observa que el aumento de los niveles hídricos del suelo se corresponde con un aumento del contenido de N total del suelo (Figura 1).

En condiciones de exceso de humedad (suelos inundados) disminuye más la actividad microbiológica que la velocidad de producción de material vegetal. Una situación extrema se da en suelos permanentemente inundados, donde la descomposición de los restos frescos se ve muy reducida, produciendo lo que se conoce como suelos de turba.

El tipo de vegetación también influye. Como se observa en la Figura 1, para un régimen climático determinado y una temperatura dada, el contenido de N total del suelo es mayor en suelos desarrollados bajo praderas que en aquellos desarrollados bajo bosque. Esto se debe a que bajo vegetación de bosque los restos vegetales son depositados en su mayoría en la superficie del suelo. En cambio, en los suelos desarrollados bajo pradera una proporción importante de la materia vegetal está formada por raíces, que cuando mueren permanecen y son descompuestas dentro del suelo. A su vez, en los suelos de pradera la mayor parte de las raíces se encuentran en los primeros centímetros del suelo.

## b) Efectos locales

### Topografía

Según el grado de la pendiente, se desarrollan suelos con distintos contenidos de materia orgánica. En general, los suelos desarrollados sobre superficies planas y bajas presentan mayores contenidos de materia orgánica que aquellos desarrollados sobre pendientes pronunciadas.

### Orientación de la pendiente

En el Hemisferio Sur, los suelos orientados hacia el Norte, que reciben niveles mayores de radiación solar, tienden a presentar mayores contenidos de MO que los suelos orientados en otras direcciones.

### Tipo de suelo

Los distintos tipos de suelos presentan, en su condición natural, diferentes contenidos de N total. Las cantidades de N total presentes en los distintos suelos pueden estimarse a partir del contenido de MOS. Por ejemplo, en los primeros 20-cm de un Vertisol con 8% de MOS, de un Brunosol con 5% de MOS, y de un Luvisol con 2% de MOS, existirían respectivamente 11.0, 7.0 y 2.8 ton.ha<sup>-1</sup> de N total. Estos cálculos son aproximados; en los mismos se asume un valor de densidad aparente de 1.2, un contenido de C del humus de 58%, y una relación C/N del humus de 10/1.



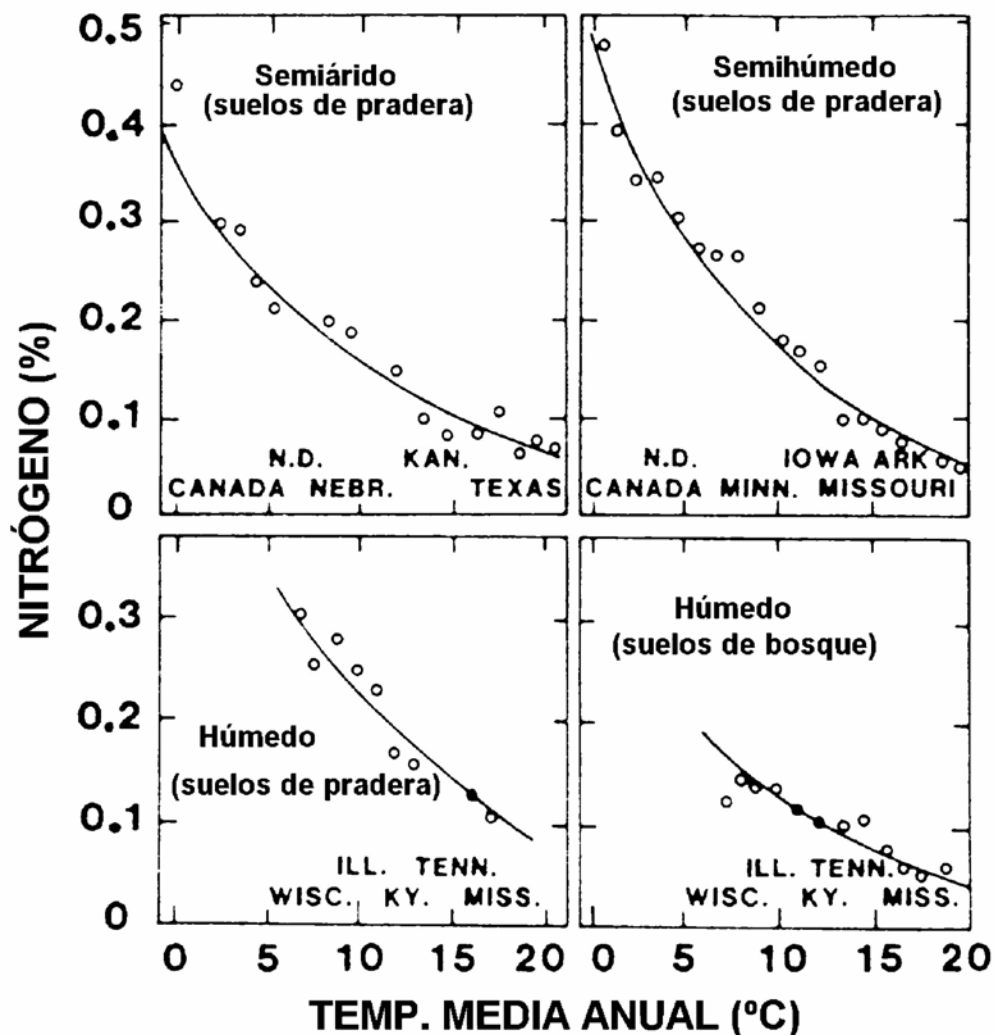


Figura 1. Relación entre el contenido promedio de N total del suelo y la temperatura promedio anual a lo largo de transectas N-S para las regiones semiáridas, semihúmedas y húmedas del centro de EEUU (adaptado de Jenny, 1930).

Los distintos tipos de suelos no sólo difieren en su contenido total de MOS, sino también en su distribución en profundidad. Como se observa en la Figura 2, en el caso del Vertisol y del Brunosol, la MOS presente en el Horizonte A disminuye gradualmente con la profundidad, aunque esta disminución es más rápida para el Brunosol. En cambio en el Luvisol, un suelo arenoso, la distribución es más homogénea en todo el perfil.

c) Material madre

El efecto principal de este factor es a través de la influencia de la textura; al aumentar el contenido de arcilla del material madre también aumenta el contenido de C orgánico de los suelos, el cual está relacionado estrechamente con el contenido de N del mismo (Figura 3). Este efecto se debe a que la fijación de sustancias húmicas en complejos órgano-minerales ayuda a preservar la MOS. A su vez, el tipo de arcilla también influye; los suelos con predominancia de arcilla montmorillonítica (smectítica) tienden a tener contenidos de MOS mayores que los suelos con predominancia de illita (arcillas micáceas), debido a que los primeros tienen una mayor capacidad de absorción de moléculas orgánicas.

d) Manejo

El contenido de MOS puede cambiar drásticamente debido al manejo, como por ejemplo, cuando se pasa de una situación de campo natural a una situación de laboreo. Cuando se laborea un suelo, aumenta la superficie específica del mismo que se expone al ataque microbiano, y aumentan también la aireación y la tasa de mineralización de la MOS. Además, con el laboreo aumenta también el riesgo de erosión, ya que ocurre una pérdida preferencial de las fracciones más finas de los primeros centímetros del suelo. Estas fracciones son generalmente las más ricas en MO. Con la cosecha del producto agropecuario también aumenta la extracción del N del suelo. Todo esto ocasiona que el contenido de MO y de N total del suelo disminuya con los años de agricultura (Figura 4). Esta disminución es más marcada en los sistemas tradicionales de agricultura continua.

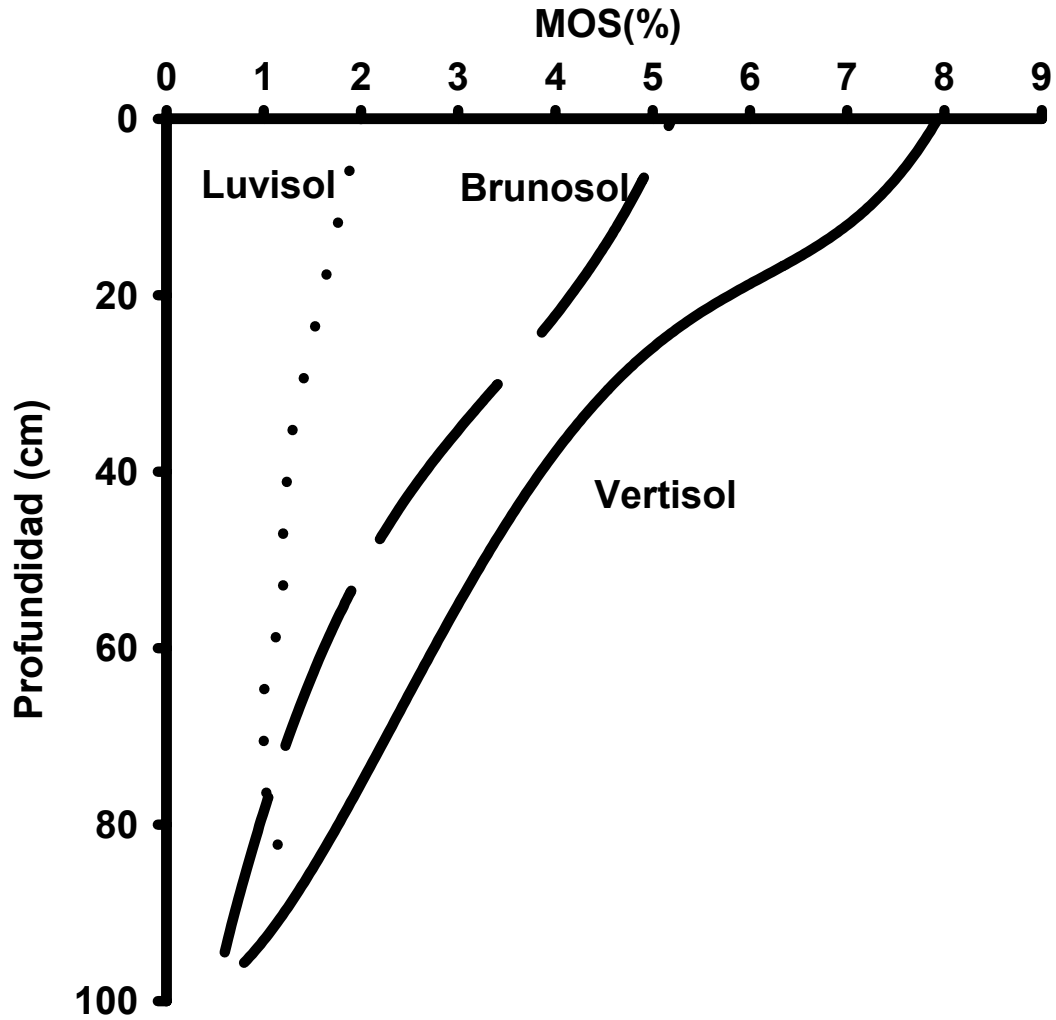
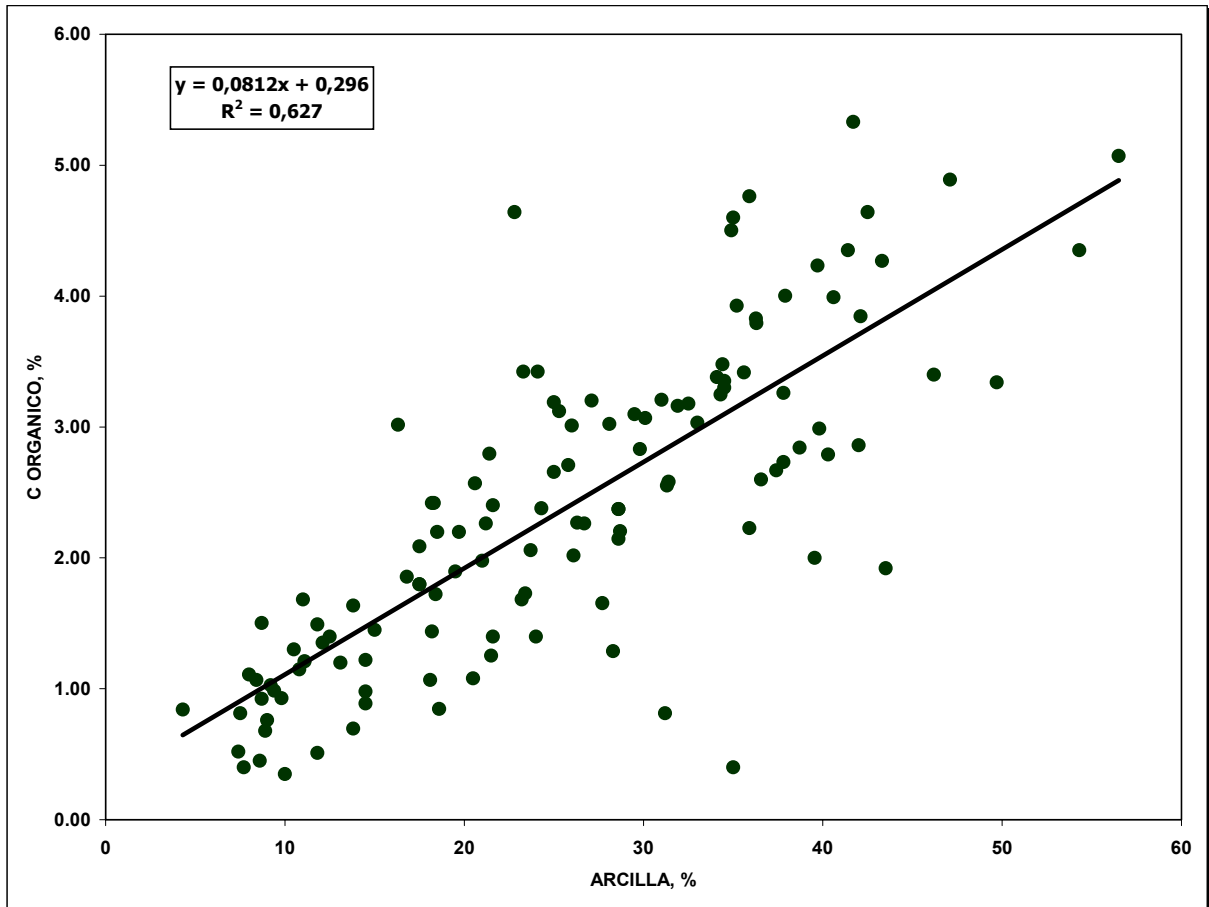
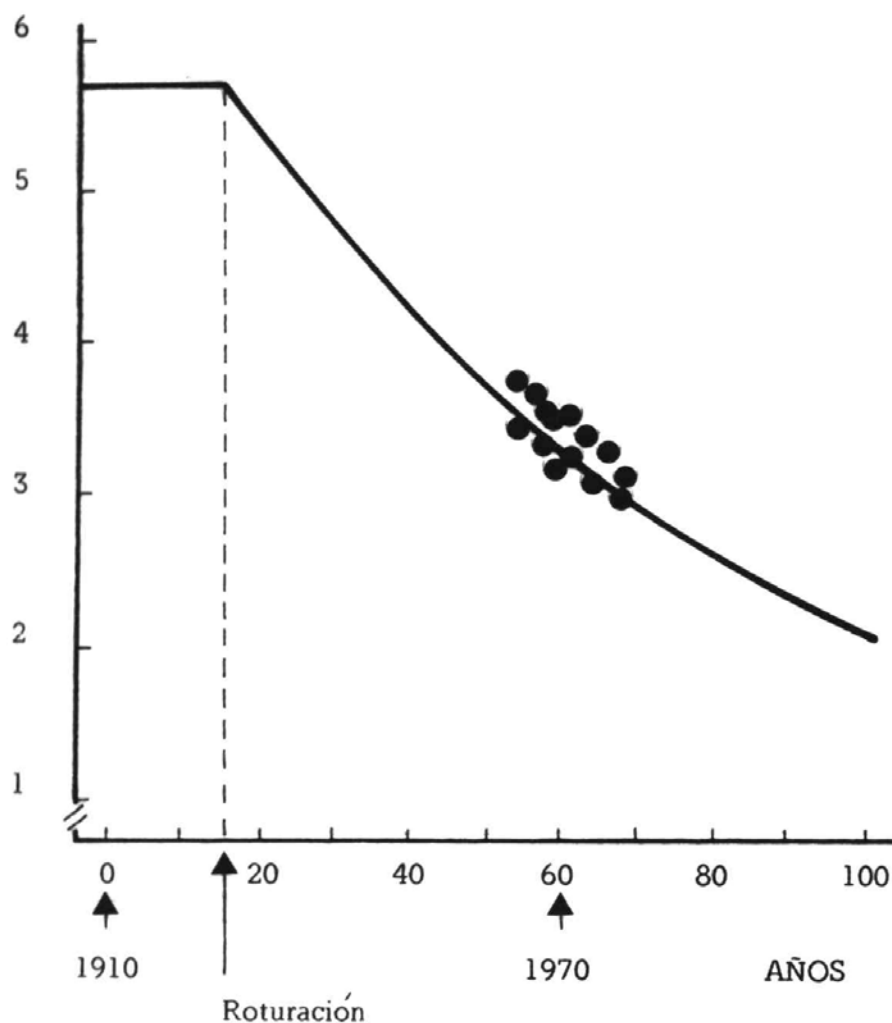


Figura 2. Contenido de la MOS en función de la profundidad en 3 tipos de suelos del Uruguay. Información adaptada de “Los Suelos del Uruguay” del Ing. Agr. Artigas Durán

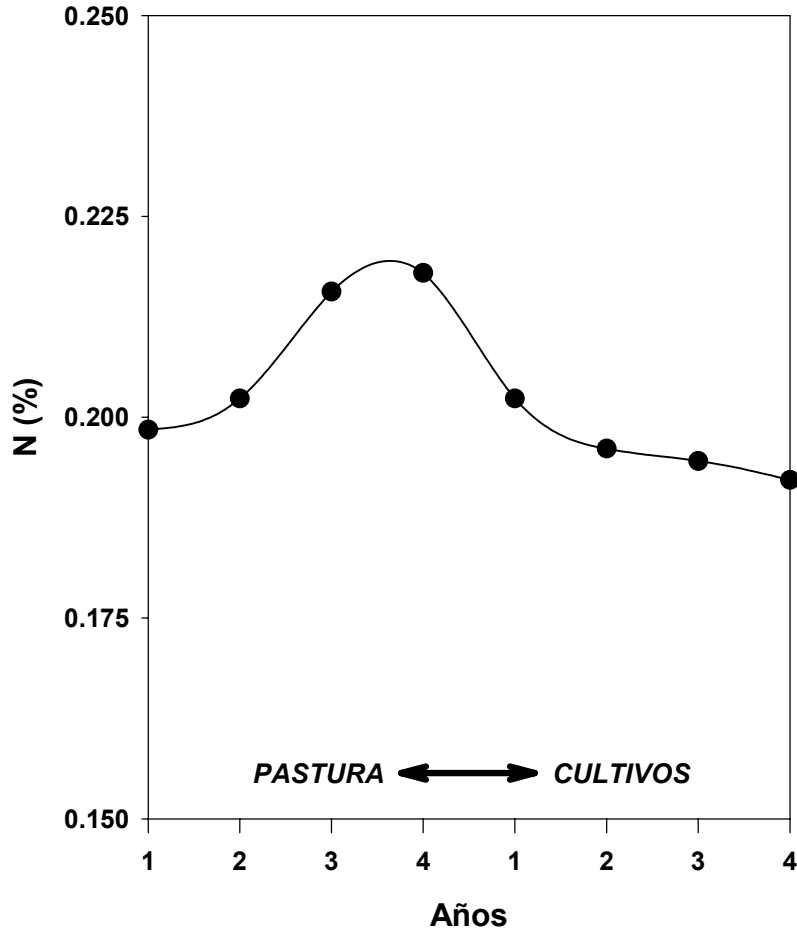


**Figura 3. Relación entre el contenido de carbono orgánico del suelo y el contenido de arcilla de varios suelos del Uruguay. Se incluyen datos de Vertisoles, Brunosoles, Argisoles, Planosoles, Luvisoles y Acrisoles. Información no publicada, cedida por Artigas Durán.**



**Figura 4. Evolución del contenido de materia orgánica de la capa arable de un Brunosol Éútrico/Subéútrico Típico, bajo agricultura permanente sin fertilización (Castro y Díaz). Adaptado de Miscelánea 24. CIAAB, 1980.**

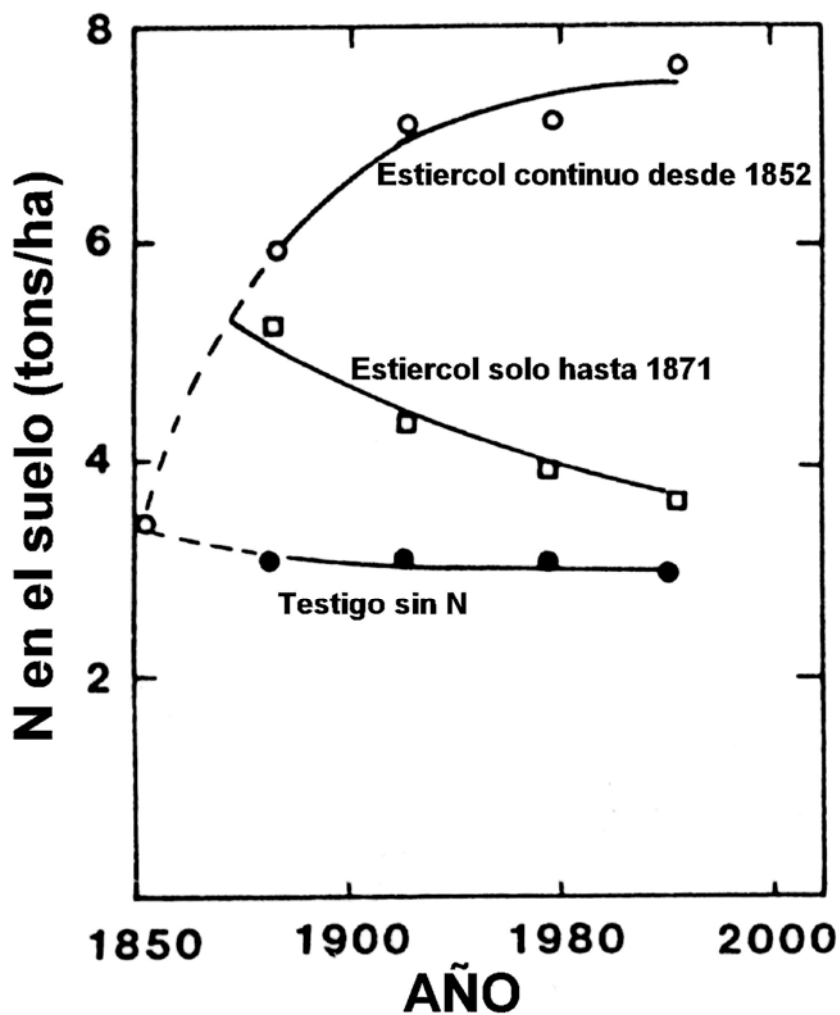
En sistemas de rotaciones de cultivos y pasturas o de siembra directa, este proceso de pérdida de MOS con el laboreo se enlentece, pudiendo incluso llegar a revertirse. En Uruguay, trabajos realizados desde 1963 en la Estación Experimental La Estanzuela han comprobado el efecto positivo de la inclusión de pasturas sobre el contenido de MOS en relación a suelos bajo cultivo continuo (Figura 5).



**Figura 5. Evolución promedio del contenido de N total del suelo para una rotación de una pastura mixta de gramíneas y leguminosas y un cultivo de grano para tres ciclos de rotación. Adaptado de Díaz, R. Revista de INIA. Investigaciones Agronómicas N°1. 1992. Tomo 1.**

Ensayos de muy largo plazo realizados en otros países han demostrado que los cambios en el contenido de MOS provocados por variaciones en el manejo son mayores al principio, y luego estos se producen a tasas cada vez menores, hasta que, a partir de cierto momento se tornan constantes. En suelos de regiones agrícolas, los mecanismos de estabilidad de la MOS explican el hecho de que, independientemente del manejo, el contenido final de N total del suelo nunca sea cero.

Un ejemplo de experimentos de larga duración son los realizados en la Estación Experimental de Rothamsted, Inglaterra (Figura 6).



**Figura 6.** Evolución del contenido de N de los primeros 20-cm de un suelo cultivado con cebada en forma continua desde 1852 en la Estación Experimental de Rothamsted. Stevenson, 1982.

Previo a la iniciación de estos experimentos en 1852, los suelos de esa zona habían estado bajo agricultura continua durante muchos años y su contenido de materia orgánica era estable. A partir de este momento, los suelos comenzaron a recibir anualmente  $35 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$  de abono orgánico, siendo cultivados continuamente con cebada. En 1951, luego de 100 años de aplicaciones continuas de estiércol, el suelo había aumentado su contenido de N orgánico de 4 a  $8 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ . En una parte de este experimento se agregó estiércol solamente durante 20 años

(hasta 1871), logrando aumentar en  $1 \text{ ton. ha}^{-1}$  su contenido de N. En 1951, el contenido de MOS había disminuido nuevamente a los niveles iniciales de 1852. El contenido de MO del testigo permaneció prácticamente constante, sugiriendo que bajo ese manejo ya se había llegado a un nivel de equilibrio.



## 2. BALANCE DE N

En sistemas naturales que no han sido alterados por el hombre la mayoría del N inorgánico que toman las plantas deriva del N de la MOS. El contenido de MOS de un sistema natural determinado tiende a permanecer relativamente constante, y el nivel de equilibrio al que se llega depende del clima, del tipo de suelo y del tipo de cobertura vegetal. Cuando ese sistema es alterado por el hombre, el nivel de MOS generalmente cambia. Estos cambios ocurren en forma más rápida al principio, y luego se enlentecen, llegando finalmente a un nuevo equilibrio. El nivel final de equilibrio al que se llega depende del manejo que se haya establecido en ese suelo. Los cambios en el contenido de N del suelo al cambiar el manejo de una situación determinada ocurren porque se cambia el balance de mecanismos de pérdida y ganancia de N del suelo.

Los principales mecanismos de ganancia de N son: a) N aportado con las lluvias; b) N proveniente de la fijación no simbiótica; c) N proveniente de la fijación simbiótica; d) N aportado por los fertilizantes y abonos orgánicos; e) N proveniente del proceso de mineralización a partir de restos frescos (vegetales y animales).

Los principales mecanismos de pérdida de N son: a) N extraído por los cultivos y los animales - aunque este es el objetivo de la actividad agrícola, es también la principal forma de salida de N del sistema; b) inmovilización c) desnitrificación; d) volatilización; e) lixiviación; f) erosión.

### I. MECANISMOS DE GANANCIA DE N

#### A. APORTE DE N CON LAS LLUVIAS

Los aportes de N por las lluvias son de escasa relevancia en la producción agrícola. En regiones desérticas se estima que las cantidades de N aportadas por este mecanismo son del orden de 5 kg. ha<sup>-1</sup>. año, mientras que en zonas de intensa actividad industrial podrían ser hasta de 30 kg. ha<sup>-1</sup>. año. Las principales formas de N aportadas por las precipitaciones son NH<sub>3</sub>, NO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O. La mayor parte de estos compuestos de N son producidos en el suelo, pasan a la atmósfera por procesos como volatilización y desnitrificación, y vuelven a caer con la lluvia en sitios cercanos a su lugar de origen. Parte del NO<sub>3</sub><sup>-</sup> que vuelve con la lluvia es producido por descargas eléctricas que ocurren en la atmósfera. Sin embargo, en términos globales la mayoría del N que vuelve al suelo con las lluvias proviene del N liberado durante la quema de combustibles fósiles y bosques, y en menor medida de la actividad volcánica (Lewis, 1993). Esto explica la tendencia creciente en las cantidades de N aportadas por este mecanismo en años recientes.

## **B. FIJACIÓN NO SIMBIÓTICA**

La fijación no simbiótica de N en el suelo puede ser realizada por microorganismos tales como bacterias de vida libre y algas azul-verde. Aunque no existen dudas de que algo de fijación no simbiótica siempre ocurre en el campo, existen escasas referencias de su magnitud. Los reportes más frecuentes provienen de regiones de clima tropical, donde por ejemplo en el cultivo de arroz las algas azul-verde (*Nostoc* y *Anabaena*) pueden fijar hasta 50 kg. ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de N.

## **C. FIJACIÓN SIMBIÓTICA**

El N proveniente de la fijación simbiótica entre especies de leguminosas y bacterias fijadoras de N es particularmente importante en la producción agropecuaria de nuestro país, donde se realizan rotaciones de cultivos con praderas mezclas de leguminosas y gramíneas, las cuales generalmente permanecen en producción por tres o cuatro años. Gran parte del N que utiliza la mezcla es obtenido del proceso de fijación simbiótica llevado a cabo por la actividad de la bacteria *Rhizobium* en los nódulos de las raíces de leguminosas como alfalfa, tréboles y lotus. En Uruguay, la cantidad de N que pueden fijar las pasturas mezclas en su segundo año de producción puede ser de hasta 300 kg. ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Mallarino et al, 1990). En una rotación de cultivos y pasturas, el N fijado por las leguminosas puede ser utilizado luego por los cultivos siguientes. En Nueva Zelandia, donde la producción agrícola está basada principalmente en pasturas, la fijación simbiótica constituye el principal mecanismo de entrada de N al sistema suelo-planta.

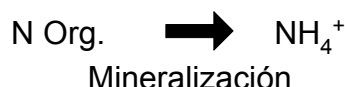
## **D. FERTILIZANTES INORGÁNICOS Y ABONOS ORGÁNICOS**

Para lograr altos rendimientos y hacer rentable la actividad agropecuaria los cultivos requieren de un buen suministro de N. Si el suelo no es capaz de aportar todo el N que demanda el cultivo, es posible suministrar parte de éste como fertilizante. Estos fertilizantes pueden originarse en procesos de síntesis química (sintetizados por el hombre) o provenir de fuentes orgánicas (por ejemplo, estiércol). Actualmente, los fertilizantes de origen químico constituyen una fuente importante de N en muchos sistemas agrícolas.

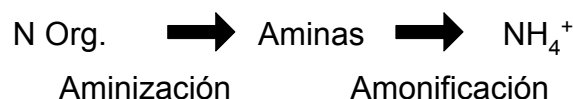
## **E. MINERALIZACIÓN DE N**

El término mineralización se usa normalmente para describir la transformación de N orgánico en N inorgánico, ya sea este en forma de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> o NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (Black, 1975, Pilbeam et al., 1993, etc.). El término amonificación se usa generalmente para describir específicamente el pasaje de N orgánico a NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (Ladd and Jackson, 1982). Otros autores, en cambio, emplean el

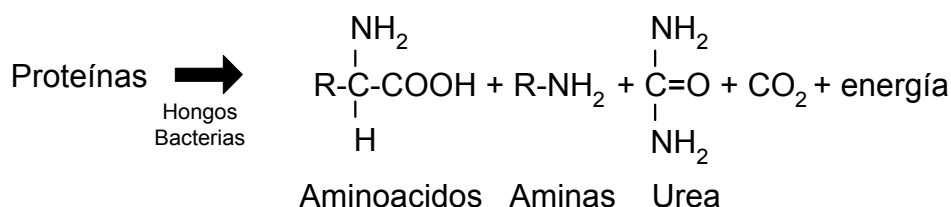
término mineralización para referirse sólo al pasaje de N orgánico a  $\text{NH}_4^+$  (Jansson y Persson, 1982). Esto se debe en parte a que el  $\text{NH}_4^+$  es la forma de N inmovilizada preferentemente por los microorganismos, a la conexión íntima que existe entre los procesos de mineralización e inmovilización de N y a que el proceso de mineralización hasta  $\text{NH}_4^+$  es realizado por los microorganismos heterótrofos del suelo, los cuales utilizan sustancias orgánicas carbonadas como fuente de energía. En este texto se ha preferido usar esta última acepción.



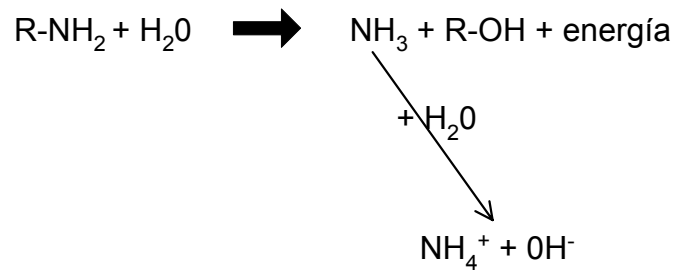
El pasaje de N orgánico a  $\text{NH}_4^+$  involucra dos reacciones, aminización y amonificación, llevadas a cabo por una gran variedad de microorganismos no especializados, incluyendo bacterias aeróbicas y anaeróbicas, hongos y actinomicetes. Es, además un proceso lento, comparado con el resto de las transformaciones que sufre el N hasta llegar a  $\text{NO}_3^-$ .



La etapa de aminización, la cual comprende la ruptura de las proteínas es realizada por bacterias y hongos heterótrofos. Las bacterias predominan en condiciones de pH neutro o alcalino, mientras que en condiciones de pH ácidas los primeros en atacar las proteínas son los hongos. En este proceso las proteínas son transformadas a aminas, aminoácidos y urea, procesos que se pueden esquematizar de la siguiente manera (Tisdale et al., 1993):



En la etapa de amonificación, las aminas y los aminoácidos son descompuestos por otros microorganismos heterótrofos, los cuales liberan  $\text{NH}_4^+$ . Las reacciones serían:



## 2) Factores que afectan la tasa de mineralización

Algunos de los factores que más inciden en la tasa de mineralización son la humedad y temperatura del suelo, aunque existen otras condiciones que también influyen como pueden ser las propiedades físicas y químicas del suelo, las prácticas de manejo o la presencia de otros nutrientes (Campbell, 1978). Debido a esta multiplicidad de factores, es de resaltar que en el campo raramente se dan todas las condiciones para que ocurra una óptima mineralización. Debido también a los numerosos factores que la afectan, los suelos difieren enormemente en su capacidad de mineralizar N.

### a) Humedad del suelo.

La mineralización es muy baja en suelos secos, pero aumenta rápidamente cuando el contenido de agua en el suelo también aumenta. Por ejemplo Alexander, 1980, encontró que la cantidad de N inorgánico acumulada en el suelo aumentó de 15 a 80 ppm de N cuando el contenido de agua del suelo pasó de 10 a 30% en un período de sólo dos semanas. Comparada con la producción de  $\text{NO}_3^-$ , la amonificación es menos dependiente de la humedad del suelo, ya que ésta es realizada por muchas clases de microorganismos, tanto aeróbicos como anaeróbicos, mientras que la nitrificación ocurre en un rango de contenido de agua más estrecho. Esto determina que el proceso de mineralización ocurra tanto en condiciones de suelos con contenidos de agua moderados hasta muy altos, e inclusive en condiciones de anegamiento. Sin embargo, bajo condiciones anaeróbicas el  $\text{NH}_4^+$  producido tiende a acumularse, ya que se reducen los requerimientos de N de los microorganismos de los suelos (Rice y Havlin, 1974).

### b) Temperatura

La mineralización de N es muy reducida a bajas temperaturas porque se limita la actividad de los microorganismos, sucediendo lo mismo a temperaturas muy elevadas. Sin embargo, debido a que la mayoría de los microorganismos que realizan este proceso son termófilos, el rango óptimo de temperatura para la mineralización se produce entre 40 y 60 ° C. Durante el proceso Durante el proceso de compostaje, en el cual se produce mineralización,

la temperatura aumenta hasta los 65 ° C. Esto puede ser comprobado fácilmente acercando la mano a este material.

c) Alternancia de secado y humedecimiento

El proceso de expansión y contracción de los suelos a causa de la alternancia de períodos de secado y humedecimiento produce ruptura en los microagregados del suelo, lo cual aumenta la superficie específica expuesta a la acción de los microorganismos. Esto lleva a que se "desestabilice" la MOS y, por lo tanto, aumenta la velocidad de mineralización. En nuestro país, este proceso tiene importancia principalmente en los meses de verano, donde es frecuente que luego de una seca prolongada, los suelos y las plantas concentren cantidades importantes de N mineral. Estas concentraciones de N en los tejidos vegetales pueden incluso producir intoxicación de vacunos con  $\text{NO}_3^-$ .

d) Reacción del suelo

Como la flora capaz de mineralizar es muy amplia, no existe un pH óptimo definido para este proceso. Sin embargo, el pH del suelo puede incidir en la tasa de mineralización del N. Aunque existen reportes contradictorios, se ha encontrado por ejemplo, que la tasa de mineralización aumenta cuando se encalan suelos ácidos (Black, 1975).

e) Micorrizas

La asociación simbiótica de algunas plantas como por ejemplo, las coníferas, con hongos ayudan a un mejor aprovechamiento del N del suelo. Los hongos micorríticos mineralizan el N orgánico, lo absorben y luego los transfieren a la planta, de la que se benefician con fotosintatos.

### 3) Caminos del $\text{NH}_4^+$

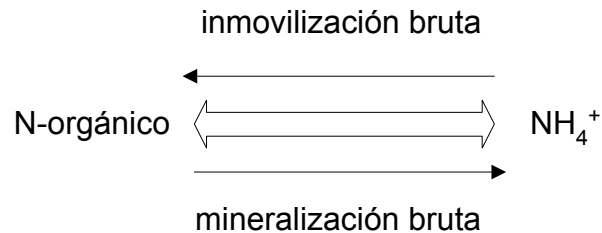
El  $\text{NH}_4^+$  producido en la mineralización tiene varios caminos a seguir: a) puede ser utilizado por microorganismos heterotróficos para descomponer más residuos orgánicos carbonados –proceso denominado “inmovilización”; b) puede ser absorbido directamente por las plantas superiores; c) puede ser convertido a  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NO}_3^-$  por nitrificación; d) puede ser fijado por minerales arcillosos; e) puede ser liberado lentamente hacia la atmósfera como  $\text{N}_2$ .

## F. INMOVILIZACIÓN DE N

Se denomina inmovilización al proceso opuesto a la mineralización. Es la transformación de N inorgánico ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$  o  $\text{NO}_3^-$ ) del suelo en N orgánico, realizada por los microorganismos cuando absorben N mineral y lo transforman en el N constituyente de sus células y tejidos.

## G. MINERALIZACIÓN – INMOVILIZACIÓN: EFECTO NETO

Es de hacer notar que los procesos de mineralización e inmovilización actúan al mismo tiempo, determinando lo que en este texto se denomina ciclo de mineralización e inmovilización (CMI), o mineralization-immobilization turnover (MIT) en inglés (Jansson y Persson, 1982).



Cada uno de estos procesos ocurre a una cierta tasa bruta, y la diferencia entre ellos resultará en un efecto neto. Cuando la cantidad de N mineral en el suelo aumenta, ocurre mineralización neta. En cambio, cuando se retira N mineral ya existente en el suelo, ocurre inmovilización neta. Este efecto neto es muy importante, pues determina la cantidad de N mineral disponible para las plantas no fijadoras de N en casos en que no se fertilice con este nutriente. Debido a que la actividad básica de los organismos heterótrofos es la disipación de energía, la mineralización neta es la reacción normal y dominante. Sin embargo, el efecto neto será siempre menor que la mineralización bruta (Jansson y Persson, 1982).

### 1) Factores que determinan el efecto neto: mineralización e inmovilización

A igualdad de condiciones climáticas, el efecto neto del CMI y su magnitud depende del tipo y de la cantidad de residuo que se esté descomponiendo (Barraclough et al, 1998). Estos factores permitirán conocer cuanto N se mineraliza o se inmoviliza a partir de un rastrojo.

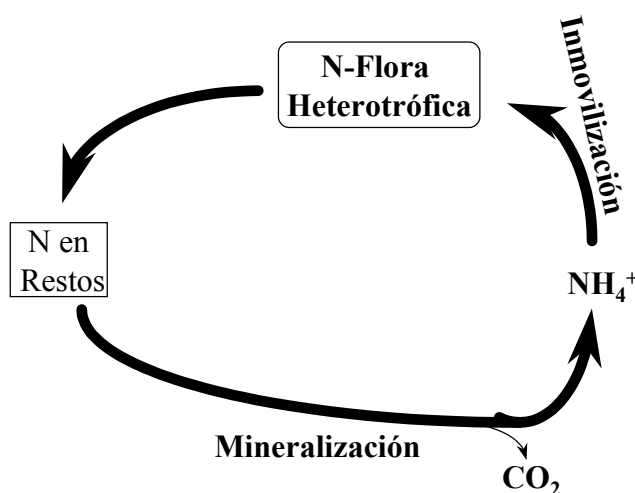
#### a) Tipo de residuo

Para entender el efecto del tipo de residuo sobre el CMI es necesario definir primero lo que se conoce como el ciclo heterotrófico del N en el suelo (Jansson y Persson, 1982). El nombre de este ciclo deriva del hecho de que el mismo está determinado por la acción de los microorganismos heterótrofos, o sea microorganismos que obtienen energía degradando estructuras orgánicas muertas produciendo  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{CO}_2$ . Cabe aclarar que si bien los microorganismos utilizan preferentemente  $\text{NH}_4^+$  como fuente de N mineral para formar sus tejidos esa preferencia no es total, ya que en ausencia de  $\text{NH}_4^+$  los microorganismos utilizan también  $\text{NO}_3^-$ . Algunos microorganismos son capaces, inclusive, de usar sustancias orgánicas

(péptidos, aminoácidos, etc.) como fuente de N (Barraclough et al, 1998). En este ciclo intervienen tres "pools" o reservóros de N en el suelo:

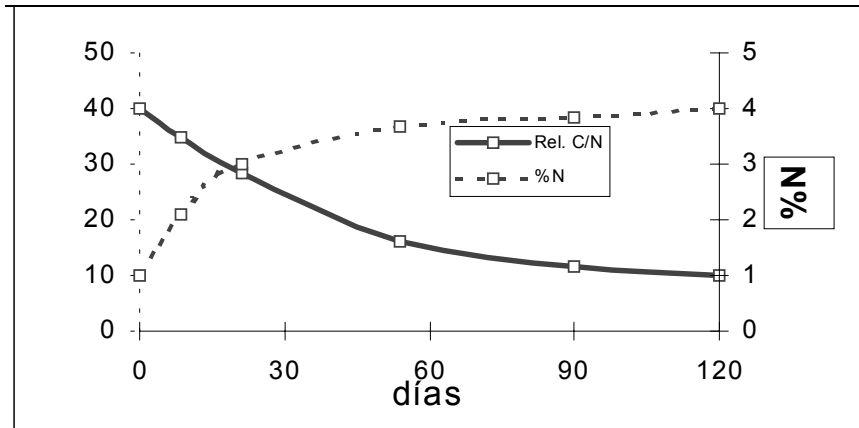
- N en la biomasa microbiana (N-micro),
- N en restos orgánicos muertos (N-restos)
- N mineral ( $\text{NH}_4^+$ )

Estos pools están conectados entre sí por los procesos de mineralización e inmovilización. En cada "giro" del ciclo, parte del  $\text{NH}_4^+$  es inmovilizado formando nuevo tejido microbiano (Figura 7).



**Figura 7. Esquema del ciclo de mineralización-inmovilización de N de un resto vegetal.**

Como consecuencia de este proceso, a medida que este ciclo "gira" el resto vegetal que se está descomponiendo se enriquece cada vez más en N y se empobrece en C, por lo que la relación C/N disminuye hasta que ésta alcanza la relación C/N del tejido microbiano, la cual en promedio es cercano a 10/1 (Figura 8). En este punto, se puede considerar que todo el residuo vegetal ha sido descompuesto. Una parte del C y N de éste pasa a formar tejido microbiano y otra parte es mineralizado como  $\text{CO}_2$  y  $\text{NH}_4^+$ .



**Figura 8. Cambios en el contenido de N y la relación C/N durante la descomposición de un rastrojo de cebada. Hende, A. van den et al, citados por Alexander, 1980.**

El agregado de materia orgánica descomponible suministra energía (E) y N para este proceso, por lo que la relación E/N del resto que se está descomponiendo determina el efecto neto. Los compuestos orgánicos sin N (carbohidratos y lípidos) sólo aportan energía y aumentan el crecimiento microbiano siempre que exista una reserva de N mineral en el pool inorgánico. Si existe deficiencia de N inorgánico, los microorganismos limitan sus actividades y el ciclo se enlentece. Por lo tanto, la "dieta" apropiada para los microorganismos del suelo será una mezcla de residuos con N y sin N, de tal manera que no exista un cambio neto en el N inorgánico del sistema (Jansson y Persson , 1982).

En condiciones prácticas, sin embargo, la relación E/N no es usada normalmente para caracterizar los residuos orgánicos el suelo. En su lugar se usa la relación C/N, estimándose que la relación óptima de este índice es de aproximadamente 25. Relaciones C/N mayores a 33/1 generalmente van a producir una inmovilización neta de N, relaciones C/N menores a 15/1 van, en cambio, a liberar N mineral al sistema, produciendo una mineralización neta. Debe tenerse en cuenta que la relación C/N es sólo una aproximación del parámetro realmente importante: la relación E/N. Las ligninas, por ejemplo, tienen relaciones C/N altas y sin embargo, debido a su complicada estructura son de difícil descomposición, resultando ser muy pobres como fuentes de energía para la mayoría de los microorganismos, no causando por lo tanto una inmovilización importante de N.

#### b) Cantidad de residuo

El efecto neto de la descomposición de un resto orgánico puede ser cuantificado en forma aproximada si se conoce el dato del contenido de N del rastrojo (ya sea el % de N o su relación C/N) al momento de su incorporación en el suelo, y de la cantidad total de rastrojo.



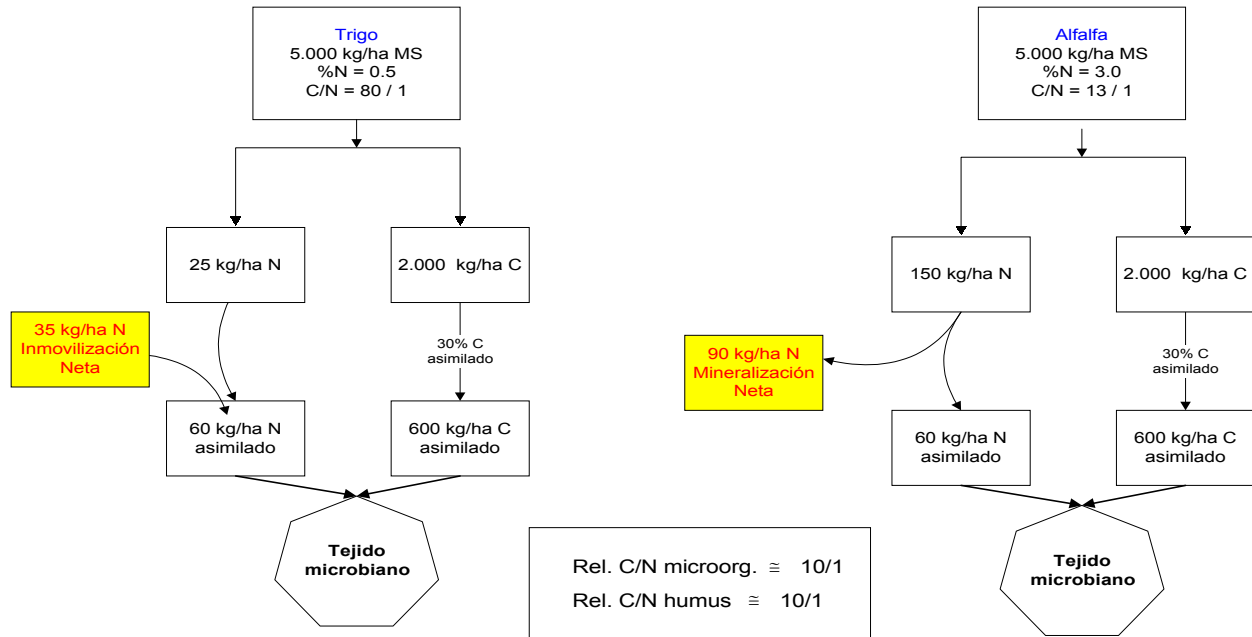
Para esto es necesario asumir que:

- Los tasa de mineralización de restos de cultivos incorporados al suelo varía entre el 50 y el 100% anual.
- El porcentaje de C de restos vegetales es cercano al 40%, y no presenta grandes variaciones entre especies.
- Cuando un residuo orgánico es descompuesto, aproximadamente 2/3 de su C es eliminado como CO<sub>2</sub> debido a la respiración efectuada por los microorganismos. El tercio restante es inmovilizado por éstos para formar más tejido microbiano.
- Los microorganismos heterótrofos tienen una relación C/N cercana a 10/1.

Supongamos que un rastrojo de gramínea madura tiene al momento de su incorporación al suelo aproximadamente 5.000 kg. ha<sup>-1</sup> de materia seca (MS). Esto equivale a 2.000 kg.ha<sup>-1</sup> de C orgánico. Un tercio de este C, o sea aproximadamente 600 kg.ha<sup>-1</sup>, es incorporado en la biomasa microbiana. Asumamos que la relación C/N del rastrojo es de 80/1 (0.5%N). Los microorganismos van a necesitar 60 kg.ha<sup>-1</sup> de N para incorporar en su tejido el C no respirado del rastrojo. Sin embargo, el rastrojo tiene en su tejido solamente 2.000/80, o sea 25 kg.ha<sup>-1</sup> de N. La diferencia entre los 25 kg.ha<sup>-1</sup> N que tiene el rastrojo y los 60 kg.ha<sup>-1</sup> que requieren los microorganismos es la inmovilización neta, o sea 35 kg.ha<sup>-1</sup> de N. En cambio, este mismo cálculo realizado para una cantidad similar de MS de leguminosa con una relación C/N de 16/1 (2.5% de N), resultará en una mineralización neta de 65 kg.ha<sup>-1</sup> de N (Figura 9).

## 2) Relación entre el CMI y la formación de humus del suelo

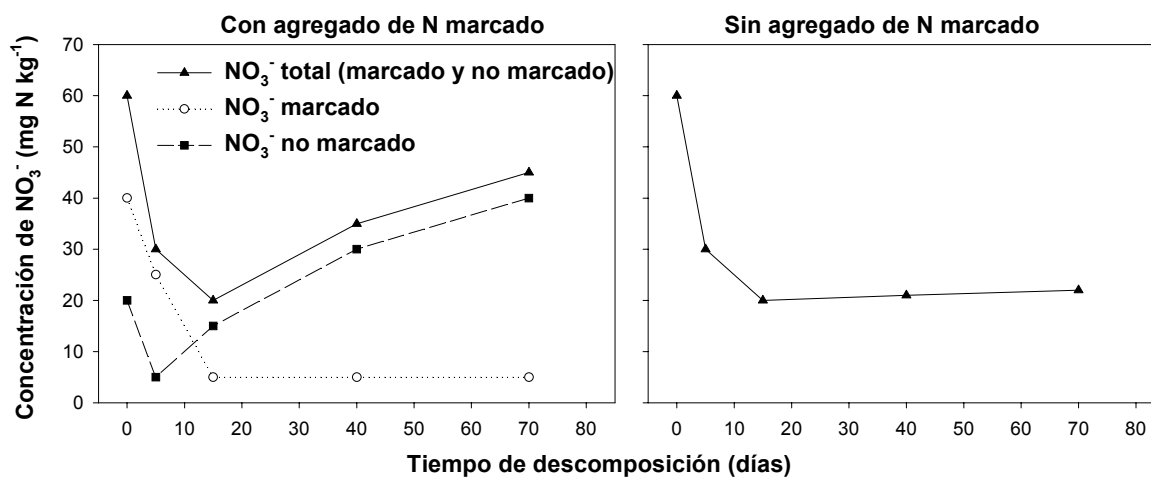
Cuando un resto vegetal está siendo atacado por los microorganismos, parte de su C y de su N pasan a formar tejido microbiano, por lo cual ese resto vegetal se va enriqueciendo en N y empobreciéndose en C. Sin embargo, ese resto nunca es totalmente mineralizado, sino que es transformado biológicamente en estructuras químicas más complejas (polimerización) de lenta mineralización. A su vez, al morir los microorganismos parte del tejido microbiano adquiere mecanismos de estabilidad. El origen microbiano del humus se evidencia también en que la relación C/N de los microorganismos es muy cercana a la relación C/N del humus (10/1).



**Figura 9. Esquema del proceso de mineralización de dos restos con diferente relación C/N.**

Stevenson, 1982, afirma que si bien una parte del N recientemente inmovilizado es liberado en el corto plazo a formas minerales disponibles para las plantas, el resto permanece en forma orgánica. En una revisión sobre el tema, este autor cita trabajos que muestran que luego de aplicado al suelo, parte del fertilizante-N pasa rápidamente a forma orgánica. En uno de estos trabajos citados, 1/3 del N aplicado se encontraba al final de la estación de crecimiento como N-orgánico. Cuatro años más tarde todavía 1/6 del N inicialmente aplicado se encontraba como N-orgánico y tenía una composición química esencialmente similar al humus del suelo. Este autor concluye que una parte importante del N aplicado al suelo permanece en forma orgánica por varias décadas. Legg y Meisinger, 1982, llegan a conclusiones similares, haciendo notar la rápida estabilización que sufre el N aplicado una vez que éste es convertido en formas orgánicas.

Green, 1995, trabajando con fertilizante marcado con  $^{15}\text{N}$ , encontró que luego de agregar un rastrojo con una alta relación C/N, el N derivado del fertilizante fue inmovilizado rápidamente y permaneció así al menos durante todo el período de incubación (Figura 10). El aumento observado en la concentración total de  $\text{NO}_3^-$  (marcado y no marcado) se debió a la mineralización de N del suelo, pero éste no provino, al menos preferentemente, del N recientemente inmovilizado. Cuando no se agregó fertilizante N, todo el N mineralizado fue usado por los microorganismos para descomponer el rastrojo, y por lo tanto la concentración de  $\text{NO}_3^-$  del suelo permaneció a niveles menores que en el caso anterior.



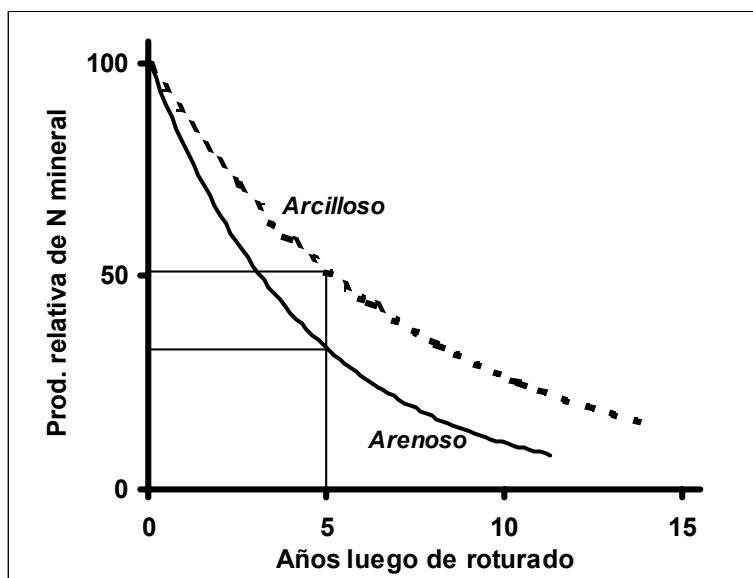
**Figura 10. Cambios en el contenido de  $\text{NO}_3^-$  del suelo luego de la incorporación de un rastrojo con una alta relación C/N con y sin agregado de fertilizante-N. El rastrojo y el fertilizante-N marcado con 15N fueron incorporados el día 0. Adaptado de Green y Blackmer, 1994.**

Debido a su lenta mineralización, las sustancias "húmicas" se acumulan con el tiempo en el suelo. Desde el punto de vista de su tasa de mineralización, estos compuestos están prácticamente excluidos del ciclo-H. Sin embargo, debido a la gran cantidad acumulada, estas sustancias constituyen una fuente importante de E y N para los microorganismos (Jansson y Persson, 1982).

El balance neto del N contenido en el humus es siempre hacia una mineralización neta, o sea hacia una liberación de N mineral al suelo. Esto sería previsible, considerando el alto contenido de N del humus (6%) y su baja relación C/N (cerca a 10/1). Los mecanismos de estabilidad de este humus, sin embargo, determinan que la tasa a la cual se da este proceso sea baja. El siguiente cálculo permite visualizar este proceso.

Un suelo con 6 % de materia orgánica (MO), contiene aproximadamente 3,6% de C orgánico ya que el porcentaje de C orgánico del humus es siempre cercano al 60%. Se puede estimar también que una hectárea de suelo hasta los 0,2 m de profundidad pesa aproximadamente  $2,5 \times 10^6$  kg. De acuerdo con esto, el contenido de N en este suelo sería del orden de  $9 \times 10^3$  kg.ha<sup>-1</sup> de N. Si la MO de este suelo se mineraliza a una tasa del orden del 1%, el N mineral liberado al sistema será del orden de 90 kg.ha<sup>-1</sup> de N. Un cálculo similar muestra que un suelo con 1% de MO liberará al suelo unos 10 kg.ha<sup>-1</sup> de N. Cabe resaltar que esta tasa de mineralización no siempre es constante. Los suelos "nuevos" tienen tasas de mineralización mayores, ya que en estos suelos son más importantes las fracciones de humus relativamente menos estables. En suelos "viejos" sucede lo contrario, ya que con los años de laboreo la tasa de mineralización del humus estable disminuye.

Aunque el humus es siempre mucho más estable que los restos, el grado de estabilidad del humus varía en los distintos suelos. En los suelos arenosos, el humus tiene menos mecanismos de estabilidad que en los suelos arcillosos. Por lo tanto, en estos suelos el humus es más atacado, pudiendo un suelo arenoso “nuevo” o “descansado” mineralizar anualmente hasta el 10% o más del N retenido en la MOS. Estos suelos, sin embargo, van a aportar N de fuentes orgánicas sólo por un corto tiempo. (Figura 11). Así, en los suelos que tienen muchos años de cultivo continuo, la fracción remanente de humus es mucho más resistente al ataque microbiano que en los suelos sin laboreo. Esto se debe a que durante el proceso de mineralización, se produce una pérdida preferencial de las fracciones relativamente más lábiles.



**Figura 11. Esquema de la producción relativa anual de N mineral en dos tipos de suelo bajo laboreo continuo.**

Como resumen, se puede afirmar que las formas de N orgánico susceptibles de ser mineralizadas incluyen dos tipos de sustancias:

a) Sustancias con un alto grado de estabilidad

Es la MOS estabilizada o humus. Constituyen la mayor parte del N del suelo (miles de kilos), y se caracterizan por tener una relación C/N baja y relativamente constante (9/1-11/1). Sin embargo, estas sustancias se mineralizan lentamente, a una tasa que fluctúa entre el 1 y el 3% anual.

Varios mecanismos han sido propuestos para explicar la resistencia de estas formas de N al ataque microbiano.

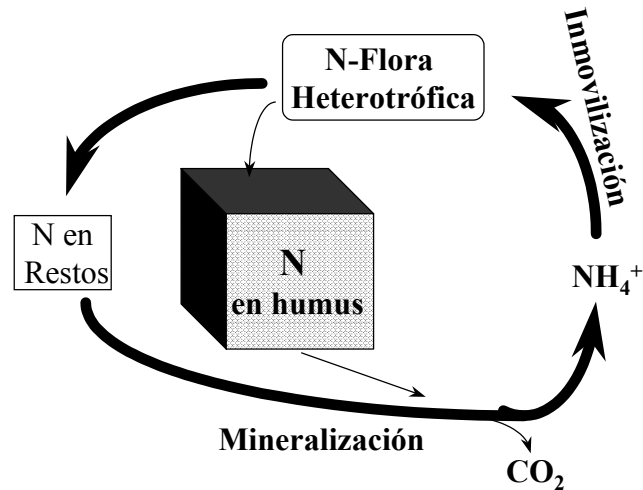
- Un primer mecanismo es la asociación de aminoácidos, péptidos y proteínas con compuestos como ligninas, taninos, quinonas. Verma et al, 1975, citados por Stevenson, 1982, demostraron la alta estabilidad de estos compuestos al unirse a anillos aromáticos.
- Un segundo mecanismo sugerido es la formación de complejos resistentes a la acción microbiológica, mediante la reacción química entre  $\text{NH}_3$  o  $\text{NO}_2^-$  con ligninas y sustancias húmicas.
- Otra teoría propuesta es la adsorción de compuestos nitrogenados a minerales arcillosos, lo cual impide su ataque por los microorganismos. Dicha asociación físico-química de compuestos nitrogenados con arcillas (Demolón y Barbieri, 1929; Giesiking, 1939; Pink, Dyal y Allison, 1954; Ensminger y Giesiking, 1942) citados por Stevenson, 1982 explicaría además la tendencia al incremento de N del suelo (o de materia orgánica) cuando aumenta el contenido de arcilla en el mismo.
- También fue sugerido que se formarían complejos biológicamente estables cuando reaccionan compuestos nitrogenados con cationes polivalentes tales como Fe, Al, etc. Por ejemplo, la alta estabilidad de la materia orgánica de los suelos alofánicos se debería a la unión del Al con las sustancias húmicas, que impediría la actividad de las enzimas.
- Otra teoría para explicar la estabilidad del N sugiere que parte del N orgánico se ubicaría en microporos inaccesibles físicamente para los microorganismos.

En forma aislada, ninguna de estas teorías explica contundentemente la estabilidad del N en el suelo. Más bien se supone que estos mecanismos actúan conjuntamente, siendo posiblemente todos ellos responsables del alto grado de estabilidad del humus.

b) Restos orgánicos recientemente incorporados al suelo y en procesos iniciales de descomposición

Las cantidades de N en esta forma son mucho menores que las cantidades presentes en la MOS estable o humus, pero este N es mucho más reactivo. Debido a que estos restos o "rastros" no tienen mecanismos de estabilidad, el efecto neto de aporte de N al suelo depende de su relación C/N. Con el tiempo, los restos de cultivos al sufrir continuos ciclos de descomposición en el suelo, tienden a parecerse cada vez más al humus.

Es de hacer notar que la diferencia entre humus y restos vegetales no es tan definida, pues siempre existen en el suelo sustancias con características intermedias. Por lo tanto, durante todo el año se está mineralizando N de estas dos fuentes. En un suelo no fertilizado y sin agregado de estiércol, el contenido de N mineral en un momento dado va a depender del N aportado por estas dos fuentes. Esto se puede resumir en la siguiente figura.

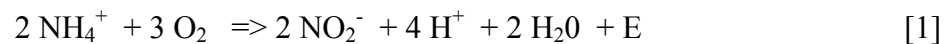


**Figura 12. Esquema del ciclo de mineralización-inmovilización de N del humus y de un resto vegetal.**

## H. NITRIFICACIÓN

La nitrificación se define como el pasaje de  $\text{NH}_4^+$  a  $\text{NO}_3^-$ , el cual es realizado por un grupo reducido de microorganismos autótrofos especializados (principalmente Nitrobacterias), que obtienen su energía (E) de este proceso oxidativo. Dicho proceso ocurre en dos etapas:

Primero se produce el pasaje de  $\text{NH}_4^+$  a  $\text{NO}_2^-$ , en donde intervienen bacterias del género Nitrosomonas.



Luego este  $\text{NO}_2^-$  es convertido a  $\text{NO}_3^-$  por bacterias del género Nitrobacter.



La reacción [2] es más rápida que la [1], y ambas reacciones son mucho más rápidas que la reacción de pasaje de N orgánico a  $\text{NH}_4^+$ , por lo que el  $\text{NO}_3^-$  es la forma de N mineral que normalmente se acumula en los suelos.

Como se observa en la reacción [1], en el pasaje de  $\text{NH}_4^+$  a  $\text{NO}_3^-$  se libera  $\text{H}^+$ , por lo que en determinadas condiciones la nitrificación puede acidificar los suelos.

### 1) Factores que afectan la nitrificación

#### a) Presencia de oxígeno

Las nitrobacterias son microorganismos aerobios estrictos, por lo que en condiciones anaerobias este proceso se detiene, acumulándose  $\text{NH}_4^+$ .

#### b) Temperatura

El rango óptimo para que se produzca la nitrificación es cercano a 30 ° C.

#### c) pH

Estos microorganismos requieren también condiciones de pH de los suelos no muy extremas, con valores óptimos de pH entre 5,5 y 7,5. Si el pH es mayor a 7 se afecta más el pasaje de  $\text{NO}_2^-$  a  $\text{NO}_3^-$ , mientras que cuando el pH es superior a 8 se afecta el pasaje de  $\text{NH}_4^+$  a  $\text{NO}_2^-$ .

#### d) Concentraciones de $\text{NH}_4^+$

Concentraciones de  $\text{NH}_4^+$  superiores a 3000 mg N kg suelo<sup>-1</sup> pueden afectar el pasaje de  $\text{NH}_4^+$  a  $\text{NO}_2^-$ , lo cual puede ocurrir cuando se fertiliza en bandas con dosis altas de fertilizantes amoniacales.

#### e) Fumigación de los suelos

Muchos de los productos agregados al suelo en la agricultura moderna (herbicidas, fungicidas, pesticidas, insecticidas) pueden afectar el desarrollo de las bacterias nitrificadoras, las cuales parecen ser las más sensibles a estos productos químicos. Son especialmente conocidos los efectos inhibitorios del disulfuro de carbono, bromuro de metilo y cloropicrin (Stevenson, 1982).

Debido a que normalmente los suelos presentan condiciones favorables para la nitrificación, la mayoría del  $\text{NH}_4^+$  producido en el suelo pasa a  $\text{NO}_3^-$ .

## II. MECANISMOS DE PÉRDIDA DE N

### A. PÉRDIDAS DE N A PARTIR DE $\text{NO}_3^-$

Desde el punto de vista agrícola y del medio ambiente, lo deseable sería que el  $\text{NO}_3^-$  de cualquier origen (suelo, material orgánico agregado o fertilizante), fuera finalmente absorbido por las plantas. Sin embargo, esta forma de N mineral puede también perderse del sistema suelo-planta. Los dos procesos de pérdida más importantes, el lavado y la desnitrificación, ocurren en condiciones de exceso de agua en los suelos. En nuestro país estas condiciones son más probables en el período otoño-invierno, especialmente cuando el suelo está en barbecho, ya que no existe un cultivo que pueda remover el  $\text{NO}_3^-$  del suelo.

### B. LIXIVIACIÓN O LAVADO

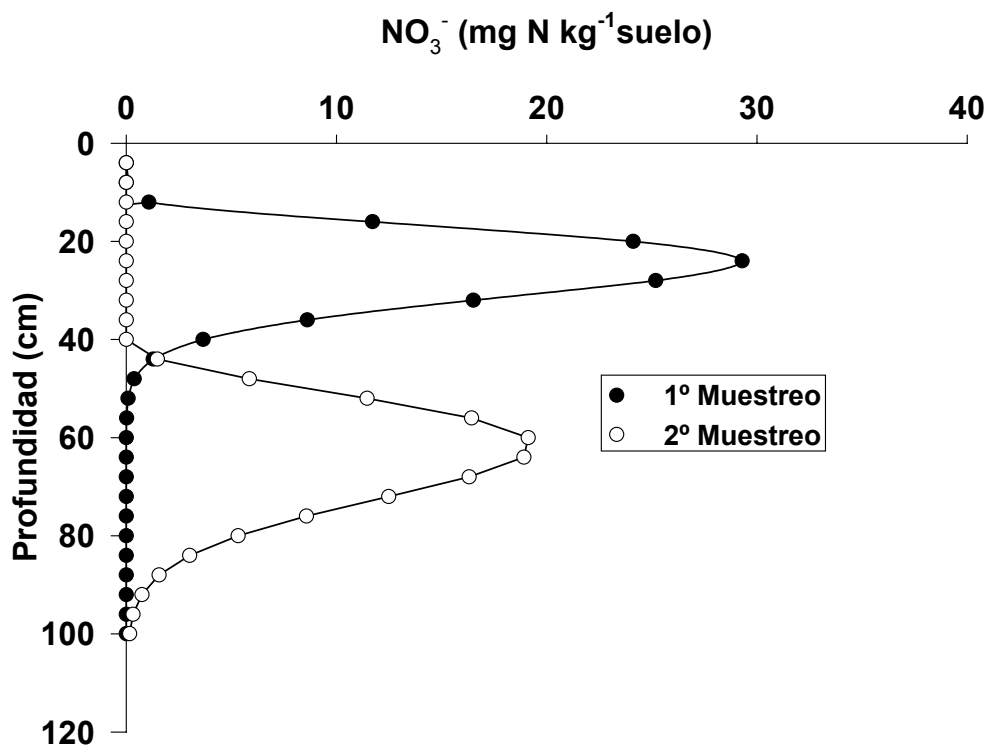
Debido a su carga negativa, el  $\text{NO}_3^-$  no es retenido por la fracción coloidal del suelo. Por lo tanto, el agua que se mueve a través del mismo puede llevar consigo el  $\text{NO}_3^-$  hacia los horizontes inferiores, proceso que se conoce como lixiviación o lavado.

El lavado es descripto generalmente asumiendo que el agua que entra al suelo desplaza al agua que estaba presente originalmente en la superficie y al soluto ( $\text{NO}_3^-$ ) disuelto en ella. De acuerdo con este modelo, el soluto inicialmente presente en el agua del suelo se mueve hacia abajo, de la misma manera que el agua originalmente presente se mueve hacia abajo.

Este movimiento hacia abajo del soluto no se produce en forma homogénea, sino que siempre existe cierta dispersión de soluto en el agua del suelo. Aunque al comienzo todo el  $\text{NO}_3^-$  estuviera concentrado a la misma profundidad, por ejemplo en la superficie del suelo, al ser arrastrado por el agua tiende a dispersarse en la misma. Por esto, generalmente la distribución de la concentración de  $\text{NO}_3^-$  con la profundidad tiene forma de campana. Esta dispersión se produce debido al movimiento al azar de los iones de soluto en el agua, el mismo fenómeno que explica la ósmosis. De todas maneras, siempre existe una zona de máxima concentración de soluto, la cual ocurre cercana al frente de movimiento del agua.

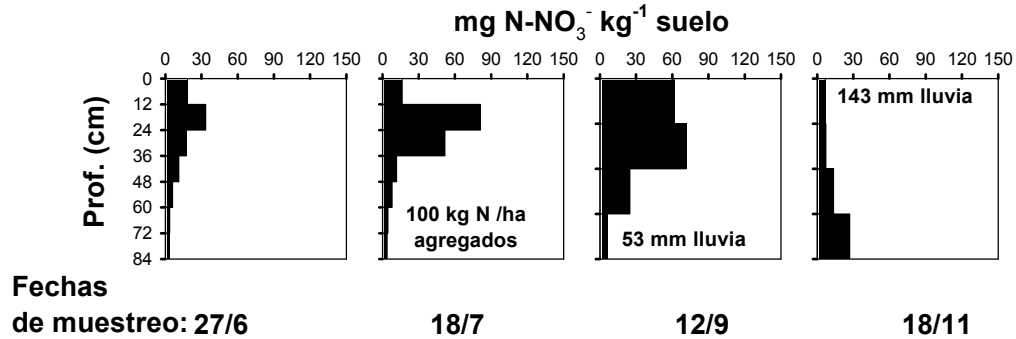
Este "pico de concentración" se mueve más en profundidad con cada cantidad adicional de agua que se agrega al suelo (Figura 13). De acuerdo con este modelo, el movimiento en profundidad del  $\text{NO}_3^-$  podría ser fácilmente detectado monitoreando la profundidad a la que se movió el frente. Sería de esperar, entonces, que cantidades relativamente pequeñas de  $\text{NO}_3^-$  se perdieran de la zona radicular de un cultivo antes que el pico de concentración se hubiera movido suficientemente dentro de esta zona radicular (por ejemplo, 1 m).





**Figura 13. Curvas teóricas del movimiento de  $\text{NO}_3^-$  en el suelo por convección-dispersión: distribución de la concentración de  $\text{NO}_3^-$  en el perfil del suelo en dos momentos de muestreo. El movimiento del pico de concentración en profundidad fue causado por una lluvia.**

Una distribución del  $\text{NO}_3^-$  en el perfil de suelo similar a esta distribución teórica es a veces observada en muestreos de suelo realizados en nuestro país, especialmente durante el período otoño-invernal. Estas tendencias generalmente se observan más claramente en suelos en barbecho, ya que en estos no existe absorción de N por las plantas (Figura 14).



**Figura 14. Distribución de la concentración de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en el perfil de un suelo en barbecho en cuatro momentos de muestreo. El suelo era un Brunosol Eutrico Típico de la asociación Cañada Nieto. El N fue aplicado el 18/7 luego del muestreo. El dato de lluvia en las dos últimas gráficas representa el total acumulado en el período entre dos muestreos. Perdomo, Casanova y Ciganda, 1996, no publicado.**

Sin embargo, muchos estudios han mostrado que cantidades sustanciales de N marcado (<sup>15</sup>N) pueden moverse en el suelo a profundidades mayores que lo esperado cuando se asume que el movimiento es sólo por desplazamiento del soluto con limitada dispersión, tal como lo asume el modelo de convección-dispersión. Estos resultados pueden ser explicados, en cambio, considerando que cantidades sustanciales de agua se mueven preferentemente a través de los macroporos del suelo (por ejemplo, fisuras, canales formados por raíces o gusanos, y otros espacios vacíos relativamente grandes en el suelo). Este movimiento preferencial puede resultar en una dispersión del soluto suficiente como para que una porción del soluto originalmente presente en la superficie del suelo se mueva hacia abajo a distancias de un metro o más antes que la mayor parte del soluto o el pico de concentración de éste se mueva apenas por debajo de los primeros centímetros. El movimiento preferencial de agua a través de macroporos es probablemente un factor importante que afecta el movimiento y el destino del N en los suelos.

## 1) Factores que afectan la lixiviación

### a) Tipo de suelo

A igualdad de otras condiciones, el tipo de suelo afecta la magnitud de las pérdidas por lixiviación, siendo ésta mayor en suelos livianos. También es importante el grado de diferenciación textural de los suelos. La presencia de un horizonte Bt saturado reduce la velocidad de pasaje de agua a través del perfil a casi cero, lo que obviamente reduce la posibilidad de lavado de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

b) Humedad del suelo

En principio, es de esperar que para la misma cantidad de lluvia el lavado sea mayor en un suelo previamente húmedo que en uno seco. Sin embargo, esta relación puede no ser tan clara, ya que en suelos de textura fina la velocidad de infiltración y la velocidad de pasaje del agua a través del suelo disminuye a medida que el contenido de agua del suelo aumenta. En nuestro país, la mayoría de los suelos agrícolas son relativamente pesados y/o tienen un horizonte Bt desarrollado, y la velocidad de pasaje del agua cuando estos suelos están saturados es lenta. Por lo tanto, y si bien no existen observaciones sistemáticas al respecto, es posible que en algunas condiciones las pérdidas por lavado sean mayores en suelos relativamente secos, donde además es más probable que existan cantidades importantes de  $\text{NO}_3^-$  acumulado.

c) Presencia de rastrojo en superficie

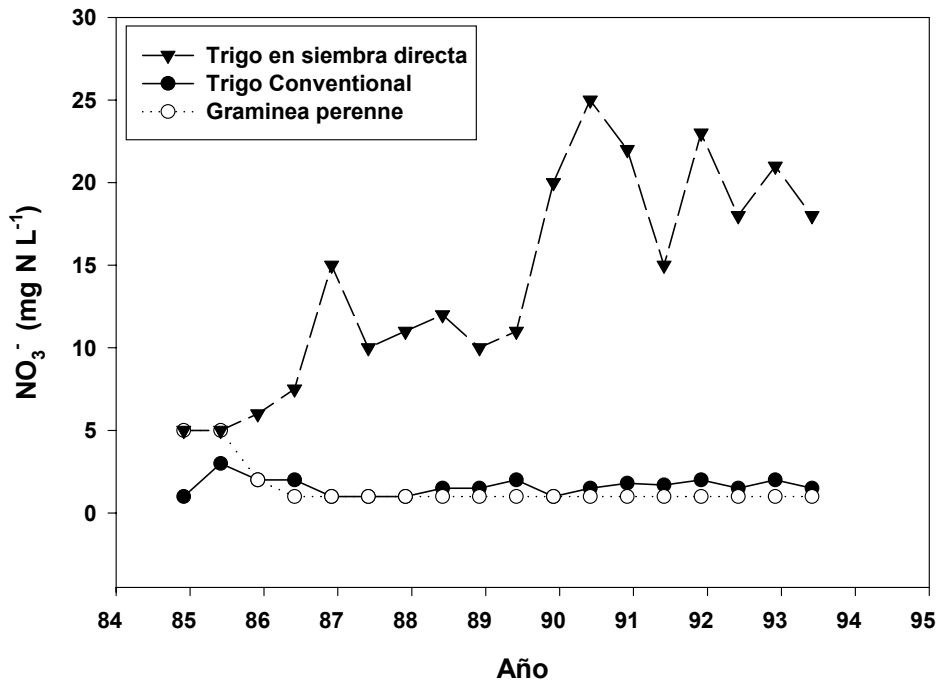
La presencia de rastrojo en superficie es otro factor importante, pues aumenta la cantidad de agua que infiltra en relación con la que escurre, por lo que aumenta la probabilidad de lavado.

d) Cultivo en crecimiento activo

La presencia de un cultivo creciendo activamente es un factor que reduce las pérdidas por desnitrificación debido, por un lado, a que el cultivo absorbe  $\text{NO}_3^-$ , disminuyendo así la concentración del soluto, y debido también a que absorbe agua, lo que provoca que menos agua pase a través del suelo.

e) Tipo de laboreo

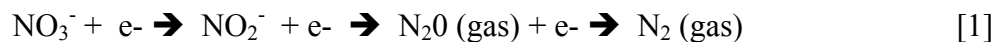
En estudios realizados en otros países se ha observado que en los suelos bajo siembra directa continua se incrementa el porcentaje de macroporos. Esto ocasiona un mayor lavado preferencial, y la lixiviación de  $\text{NO}_3^-$  tiende a aumentar con respecto a condiciones bajo laboreo convencional. Un ejemplo de estas tendencias son los resultados obtenidos en suelos bajo cultivo de trigo por Sharpley y Smith, 1993, en una región de Oklahoma donde la lluvia promedio anual es del orden de 740 mm (Figura 15). Este aumento del lavado ocurre tanto para el  $\text{NO}_3^-$  como para otras sustancias solubles en agua y poco adsorbidas al suelo. En cambio, en sistemas de siembra directa se reduce la erosión y el escurrimiento, y con esto se reduce no solo la pérdida de suelo por erosión sino también la pérdida de otros nutrientes fuertemente adsorbidos al suelo, como por ejemplo el P.



**Figura 15. Evolución de la concentración de  $\text{NO}_3^-$  del agua subterránea de un suelo de Oklahoma bajo tres condiciones de manejo. Información adaptada de Sharpley y Smith, 1995.**

### C. DESNITRIFICACIÓN

La desnitrificación es un proceso de reducción biológica realizado en el suelo por un gran número de microorganismos anaerobios facultativos. En condiciones de anaerobiosis estos microorganismos utilizan el  $\text{NO}_3^-$  y el  $\text{NO}_2^-$  en lugar de  $\text{O}_2$  como aceptores de electrones ( $e^-$ ), produciendo dos formas gaseosas de N,  $\text{N}_2\text{O}$  (óxido nitroso) y  $\text{N}_2$  (N molecular). Este proceso se puede expresar como:



Hauck, 1981, basándose en resultados de ensayos con  $^{15}\text{N}$  estima que en promedio, del 25 al 30% del N aplicado como fertilizante se pierde por este proceso.

## 1) Factores que afectan las pérdidas por desnitrificación

### a) Energía

Este proceso requiere un aporte de energía externa, expresada en la ecuación por el suministro de electrones ( $e^-$ ). Esto significa que para que este proceso ocurra debe existir en el suelo materia orgánica de fácil descomposición. Por esto, la tasa de desnitrificación tiende a ser máxima en los horizontes superiores, donde se concentra la mayor parte de la MOS.

### b) Temperatura

Al igual que ocurre con otros procesos biológicos, la tasa a la cual se produce este proceso aumenta con la temperatura. Las temperaturas mínimas citadas oscilan entre 2.7 y 10 °C, la máxima sería de alrededor de 75 °C y la óptima cercana a los 65 °C. (Firstone, 1982). En los distintos climas, sin embargo, estos microorganismos tienen distintos óptimos, lo que demuestra que estos microorganismos son capaces de adaptarse y crecer en un amplio rango de temperaturas de suelo. Al respecto, se ha observado que en regiones templadas los microorganismos desnitrificadores pueden crecer a temperaturas menores que los de regiones cálidas (Firestone, 1982).

En nuestro país algunos estudios preliminares sugieren que las temperaturas de invierno no limitarían totalmente la desnitrificación. En ensayos de laboratorio, Perdomo y Dodera, 1989, midieron la tasa de desaparición de  $\text{NO}_3^-$  en muestras incubadas a distintas temperaturas. Para las muestras incubadas in situ en el suelo por dos días (temperaturas de suelo promedio de 11.5 °C), la tasa de desaparición de nitrato fue el 70% de la tasa máxima (28 °C). Luego de dos días de incubación a 11.5 °C había desaparecido un 36% del  $\text{NO}_3^-$  agregado, mientras que a los 7 días las pérdidas fueron totales.

### c) Anaerobiosis

Las anaerobiosis se produce normalmente como consecuencia de anegamiento de los suelos. Esto es más frecuente en suelos poco permeables con horizontes Bt muy pesados. Si bien el lavado y la desnitrificación pueden ocurrir simultáneamente, la desnitrificación sería más importante en condiciones de agua estancada, cuando no existiría movimiento rápido hacia horizontes inferiores.

En nuestro país, un ejemplo de una situación productiva donde las pérdidas por desnitrificación pueden ser importantes es en el cultivo del arroz. Este cultivo se inunda a los 30-45 días de sembrado en condiciones de temperatura relativamente altas (noviembre, diciembre). Por esto es inevitable que parte del  $\text{NO}_3^-$  acumulado en el suelo se pierda por desnitrificación cierto tiempo después de la inundación. Para evitar pérdidas posteriores por este mecanismo, el cultivo debe permanecer inundado hasta su madurez fisiológica. Un retiro temporario del riego puede provocar la nitrificación del N mineral presente, el cual en

condiciones de anegamiento se encuentra casi solamente como  $\text{NH}_4^+$ . Al volver a inundar el cultivo, este N sería nuevamente desnitrificado.

#### d) Reacción del suelo

El rango óptimo de pH para este proceso es similar al de otros realizados por microorganismos heterótrofos. La tasa de desnitrificación sería relativamente independiente del pH en el rango de 6 a 8, disminuiría apreciablemente en suelos de pH menor a 5 y sería casi nula en suelos de pH menor a 3,5 (Firestone, 1982).

En nuestro país todavía no se tiene información suficiente acerca de la importancia relativa del lavado o la desnitrificación como mecanismos de pérdida. Hasta que esto suceda, parece razonable asumir que ambos procesos son parcialmente responsables por las pérdidas de N que ocurren en condiciones de exceso hídrico. Esta falta de información se debe en parte a que la metodología para medir el proceso de desnitrificación en el campo es muy complicada, por lo cual las pérdidas de N por este mecanismo generalmente se estiman por diferencia.

### D. PÉRDIDAS DE $\text{NH}_3$ POR VOLATILIZACIÓN

La volatilización, junto con la desnitrificación son los procesos del ciclo del N mediante los cuales el N vuelve a la atmósfera. El término volatilización se utiliza para describir el proceso de pérdida de N del suelo como amoníaco ( $\text{NH}_3$ ). Basándose en una revisión de resultados de experimentos de balance de N usando  $^{15}\text{N}$ , Hauck estima que las pérdidas de N por ese proceso del fertilizante nitrogenado aplicado serían en promedio del orden del 15 a 20%.

El  $\text{NH}_4^+$  intercambiable del suelo ( $\text{NH}_4^+$  (int)) se encuentra en equilibrio con el  $\text{NH}_4^+$  disuelto en la solución del suelo ( $\text{NH}_4^+$  (sol)) Este proceso de pérdida comienza cuando el  $\text{NH}_4^+$ (sol) en medio alcalino pasa a formar  $\text{NH}_3$  disuelto en la solución del suelo ( $\text{NH}_3$  (sol)), de acuerdo a la reacción [1].



De esta ecuación se puede derivar la constante de equilibrio afectada por la concentración de  $\text{H}^+$  de la solución, como se muestra en la ecuación [2].

$$\frac{[\text{NH}_3(\text{sol})][\text{H}^+]}{[\text{NH}_4^+(\text{sol})]} = K = 10^{-9.5} \quad (25^\circ\text{C}) \quad [2]$$

De esta última ecuación se deriva la ecuación [3], la cual muestra el efecto del pH en la proporción de N en la solución que se encuentra como  $\text{NH}_3$  o como  $\text{NH}_4^+$ .

$$\log \frac{[\text{NH}_3 (\text{sol})]}{[\text{NH}_4^+ (\text{sol})]} = -9.5 + \text{pH} \quad [3]$$

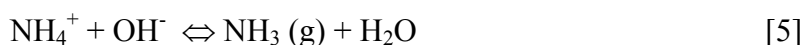
De acuerdo con esto, a mayores valores de pH, mayor va a ser la proporción de N amoniacal que se encuentra como  $\text{NH}_3$ . A valores de pH de 5, 7 y 9, aproximadamente el 0.0036, 0.36 y 36% del N amoniacal en la solución estará presente como  $\text{NH}_3 (\text{sol})$ .

El aumento en la concentración de  $\text{NH}_3 (\text{sol})$  por agregado de  $\text{NH}_4^+$  o por aumento del pH resulta en un aumento en la presión parcial del  $\text{NH}_3$  del aire ( $\text{NH}_3 (\text{gas})$ ), como se indica en la ecuación [4].



Por lo tanto, la tasa de pérdida de  $\text{NH}_3$  de una solución está directamente relacionada con la diferencia de presión parcial entre el  $\text{NH}_3 (\text{gas})$  y el  $\text{NH}_3 (\text{sol})$ . Debido a que la concentración de  $\text{NH}_3 (\text{gas})$  es baja y relativamente constante, la tasa de volatilización de amoníaco de soluciones está directamente relacionada a la concentración de  $\text{NH}_3 (\text{sol})$ , la cual está determinada a su vez por el pH de la solución y la concentración de  $\text{NH}_4^+$ . Por lo tanto, las pérdidas por volatilización pueden ocurrir siempre que existan altas concentraciones de  $\text{NH}_3$  cerca de la superficie del suelo. Esto generalmente ocurre luego de la aplicación de fertilizantes amoniacales o materia orgánica fácilmente descomponible en la superficie de suelos neutros o alcalinos, o cuando se concentra un fertilizante alcalino amoniacal en un volumen limitado de suelo.

El proceso de volatilización de  $\text{NH}_3$  frecuentemente se expresa de manera simplificada como se indica en la siguiente ecuación:



## 1) Factores que afectan las pérdidas por volatilización

Si todos los otros factores permanecen constantes, se pueden establecer relaciones generales entre algunos factores que afectan las pérdidas y su magnitud.

### a) Reacción del suelo

Como se deriva de lo discutido anteriormente (ec.[1], etc.), un aumento del pH del suelo tiende a aumentar las pérdidas de N. Sin embargo, en algunas condiciones la magnitud de las pérdidas puede hacerse independiente del pH del suelo. En el caso de la urea, por

ejemplo, el pH alcalino que se crea alrededor de las partículas que se están disolviendo es más importante que el pH de suelo.

Del análisis de la ecuación [1] y [4] surge que a mayor volatilización de  $\text{NH}_3$ , mayor es el residuo de  $\text{H}^+$  que queda en la solución del suelo. Esto produce un descenso del pH y finalmente detiene esta reacción. Por esto, las pérdidas de  $\text{NH}_3$  nunca son completas.

b) Temperatura

Un aumento de la temperatura tiende a incrementar las pérdidas hasta aproximadamente  $45^\circ\text{C}$ , debido a que aumenta la constante de equilibrio de la ecuación [2] y la velocidad de difusión de  $\text{NH}_3$  (sol) hacia  $\text{NH}_3$  (gas).

c) Concentración de  $\text{NH}_4^+$

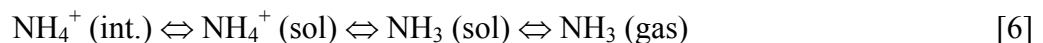
De acuerdo con la ecuación [1], la volatilización aumenta con el aumento de  $[\text{NH}_4^+]$ .

d) Velocidad del viento

El viento disminuye la presión parcial de  $\text{NH}_3$  (gas) sobre el suelo, y por lo tanto aumenta la velocidad de pasaje de  $\text{NH}_3$  (aq) a  $\text{NH}_3$  (gas). Sin embargo, según Nelson (1982) la concentración de  $\text{NH}_3$  (gas) sobre el suelo nunca sería lo suficientemente elevada como para limitar la velocidad de pérdidas.

e) Características del suelo

Se ha observado que las pérdidas de urea son mayores en suelos arenosos que en suelos arcillosos; esta diferencia se explica por la diferencia de CIC entre ambos tipos de suelo. De acuerdo con la ecuación [6], a mayor CIC mayor va a ser la proporción del  $\text{NH}_4^+$  del suelo que va a estar en forma intercambiable, es decir retenido por la fase sólida del suelo.



f) Modo de aplicación del fertilizante

Relacionado con el ítem anterior, el modo de aplicación del fertilizante afecta las pérdidas en forma muy importante. Cuando el fertilizante se aplica a la siembra normalmente queda cubierto por el suelo y no hay pérdidas por volatilización de  $\text{NH}_3$ . En cambio, la aplicación de fertilizantes amoniacales directamente sobre el cultivo sin cobertura de suelo disminuye la probabilidad de que el  $\text{NH}_4^+$  sea retenido por la fase sólida del suelo y aumenta la probabilidad de pérdidas. Las aplicaciones de fertilizante nitrogenado en cobertura son comunes en la refertilización de cultivos como trigo o cebada (al macollaje), o maíz (al estado



de 6 hojas). La aplicación de N en cobertura a cultivos en siembra directa incrementa aún más la probabilidad de pérdidas, porque el rastrojo presente sobre la superficie disminuye todavía más la fracción del fertilizante nitrogenado que entra en contacto con el suelo.

#### g) Humedad

Los estudios realizados sobre el efecto de la humedad en las pérdidas por volatilización muchas veces han producido resultados contradictorios, quizás debido a que los demás factores en estudio no estaban a niveles constantes. Nelson, 1982, luego de revisar muchos trabajos en el tema concluye que:

- Esencialmente no existen pérdidas de  $\text{NH}_3$  cuando se aplican fertilizantes sólidos a suelos con baja humedad. Esto se debe a que los fertilizantes requieren cierta humedad para disolverse.
- Las mayores cantidades de pérdida de  $\text{NH}_3$  por volatilización se obtienen normalmente en suelos con contenidos altos de humedad que se están secando.
- Contenidos iniciales altos de humedad en el suelo tienden a reducir las pérdidas de  $\text{NH}_3$  cuando los suelos no se están secando.

Con relación a los dos últimos ítems, actualmente existe acuerdo en que la volatilización de  $\text{NH}_3$  del suelo puede ocurrir sin pérdida concomitante de agua. Sin embargo, en la mayoría de los casos estudiados la pérdida de agua aumenta la pérdida de  $\text{NH}_3$  al incrementar la concentración de  $\text{NH}_3$  (sol) y prevenir la nitrificación del  $\text{NH}_4^+$ .



### 3. CICLO DEL N EN LOS SUELOS

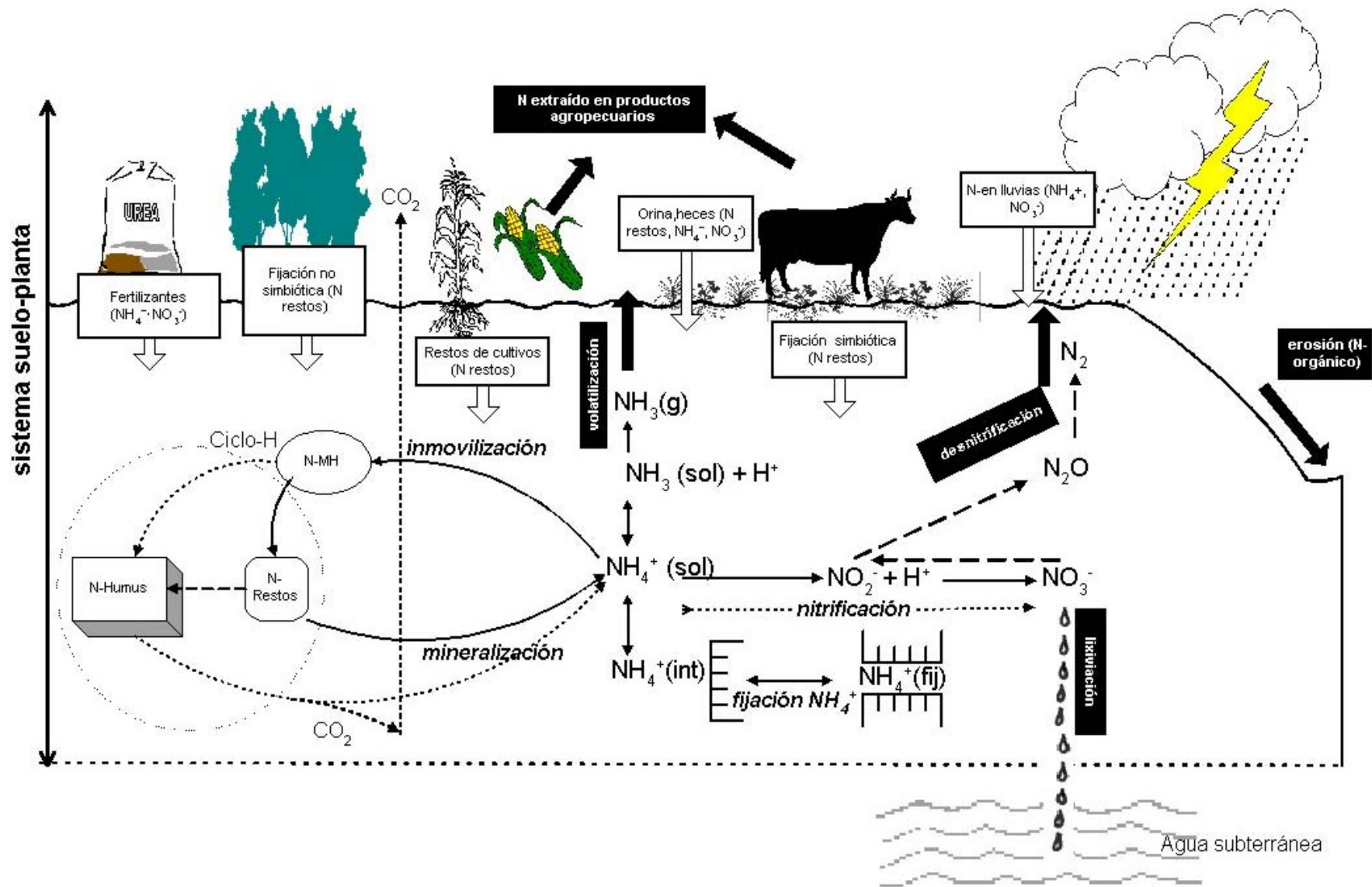
Los distintos procesos de pérdida y ganancia de N del sistema actúan en forma simultánea en el suelo (Figura 16), y se relacionan con el ciclo de mineralización e inmovilización (CMI) del N. La importancia relativa de cada uno de estos procesos está además afectada por las condiciones de clima. La complejidad de estas reacciones, interaccionando entre sí y con el medio ambiente, lleva a que sea difícil predecir la cantidad de N mineral presente en el suelo y disponible para la absorción por las plantas en un momento dado. Actualmente, mediante modelos matemáticos de simulación es posible estudiar todos estos procesos en forma conjunta, y simular incluso el clima. Muchas veces estas herramientas son útiles para avanzar en la comprensión de estos fenómenos, pero no están aún lo suficientemente avanzadas como para recomendar su uso en situaciones concretas de campo. Por lo tanto, para poder utilizar el N en forma eficiente tanto el N del suelo como el N agregado, resulta imprescindible junto con el criterio agronómico del técnico, el uso de herramientas de análisis de suelo y planta.

El destino del N agregado con el fertilizante, por ejemplo en la siembra de un cultivo invernacional, puede ser muy variado. Si se agrega N a un suelo que tiene una gran cantidad de rastrojo con alta relación C/N, como en el caso de restos de maíz o sorgo, gran parte del  $\text{NH}_4^+$  producido será inmovilizado por los microorganismos, y por lo tanto poco de este N mineral estará sujeto a pérdidas, pero también será poco el N disponible para el crecimiento vegetal. En cambio, si el N fue agregado a un suelo con poco rastrojo o con un rastrojo con baja relación C/N, gran parte del N mineral será nitrificado, y estará disponible para la absorción temprana del cultivo, pero también estará sujeto a pérdidas, como lavado o desnitrificación.

La cantidad de N mineral disponible para la absorción en etapas más avanzadas del cultivo, como por ejemplo al macollaje de trigo, va a estar determinado en parte por los eventos ocurridos en el período siembra-macollaje. Como la magnitud de estos diferentes procesos es de difícil predicción, resulta razonable evaluar mediante indicadores la disponibilidad de N en este momento, y así decidir las necesidades de fertilización en forma objetiva. La aplicación de parte del N en esta etapa (fraccionamiento) tiene la ventaja de que se realiza en un momento de rápida absorción de N, y por lo tanto la eficiencia de uso de N por las plantas es mayor. Sin embargo, debido a que en esta etapa el N se aplica en superficie, también son mayores las chances de pérdida por volatilización.

Si bien es importante minimizar las pérdidas, normalmente las mayores vías de salida de N son las extracciones en los productos agropecuarios. Cuanto más intensivo es el sistema más posibilidad existe de que el nivel de fertilidad del suelo se vea afectado. Esto puede evitarse con diversas medidas de manejo (rotaciones de cultivos y pasturas, agregados de materiales fertilizantes orgánicos e inorgánicos, etc.). La decisión de la medida de manejo correcta solo puede lograrse cuando se conocen los aspectos básicos involucrados.

**Figura 16. Esquema del ciclo del N en el sistema suelo-planta. Las ganancias de N se representan con un recuadro y flechas de fondo blanco. Entre paréntesis se indica el lugar del ciclo donde se produce la entrada de N al sistema. Los procesos de pérdida de N se representan con un recuadro y flechas de fondo negro.**



## **4. FERTILIZANTES NITROGENADOS**

Los fertilizantes nitrogenados se clasifican, según su origen, en orgánicos e inorgánicos.

### **I. FERTILIZANTES NITROGENADOS ORGÁNICOS**

Las fuentes orgánicas de N fueron muy empleadas antes del desarrollo y utilización de los fertilizantes sintéticos. Actualmente son la base de la agricultura llamada orgánica, que pretende obtener productos “orgánicos” o “naturales”. En muchos países, estos productos, si están certificados, reciben un sobreprecio. En general, los contenidos de N en las fuentes orgánicas son del orden del 1 al 3%, por lo cual para aplicar cantidades significativas de N es necesario utilizar altas dosis del material orgánico. La mayoría del N de estos materiales no es soluble en agua, por lo que este N se va liberando a medida que se va mineralizando. Sin embargo, esta liberación no siempre ocurre lentamente. En algunos materiales, si se dan las condiciones de temperatura y humedad adecuadas gran parte del N orgánico es convertido en  $\text{NO}_3^-$  en las primeras 2 a 4 semanas de aplicado. Es importante entender que los procesos y reacciones en el suelo discutidos anteriormente ocurren independientemente del origen de ese N. El empleo de materiales orgánicos es analizado específicamente en otro texto.

### **II. FERTILIZANTES NITROGENADOS INORGÁNICOS**

Antes de 1939 los derivados de N más aplicados en agricultura eran el nitrato de sodio, la cianamida cálcica y el sulfato de amonio. El nitrato de sodio procedía de depósitos costeros de Chile y Perú. La cianamida cálcica es un fertilizante sintético, aunque su uso más importante era como defoliante. El sulfato de amonio es un subproducto de la industria del gas (en el proceso de gasificación se desprende amoníaco, el cual se hace combinar con ácido sulfúrico, formándose sulfato de amonio).

Los fertilizantes sintéticos comenzaron a producirse y utilizarse masivamente luego de la Segunda Guerra Mundial, ya que las plantas industriales que habían sido construidas para fabricar nitratos con objetivos bélicos, fueron luego destinadas a la producción de fertilizantes. Además, entre los años 1950 y 1975 se produjo la llamada Revolución Verde donde se logró la producción a escala comercial de los cultivos característicos de la agricultura moderna: híbridos de altos rendimientos, con mayores contenidos de aminoácidos esenciales, mayor resistencia a enfermedades y mejores adaptaciones al medio ambiente que sus progenitores. La síntesis de fertilizantes nitrogenados en gran escala potenció el desarrollo de dichos híbridos.

La mayoría de los fertilizantes nitrogenados inorgánicos derivan del amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), obtenido por síntesis de N e H gaseosos, o de la industria del carbón. A partir del  $\text{NH}_3$  se elaboran muchos fertilizantes nitrogenados.

Dentro de las fuentes nitrogenadas inorgánicas existen dos grandes tipos: las amoniacales y las nítricas. En la Tabla 2 se presentan la fórmula y contenido porcentual de algunos de los fertilizantes más frecuentemente usados.

**Tabla 2. Composición promedio de algunos fertilizantes nitrogenados**

FERTILIZANTE	FORMULA	N (%)
Nitrato de amonio	$\text{NH}_4\text{NO}_3$	33
Fosfato monoamónico	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	11
Fosfato diamónico	$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	21
Sulfato de amonio	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	21
Nitrato de calcio	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	16
Nitrato de sodio	$\text{NaNO}_3$	16
Urea	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	46
Nitrato de amonio cálcico	$(\text{NO}_3) \cdot \text{NH}_4\text{Ca}$	27
Nitrosulfato de amonio	$\text{NH}_4\text{NO}_3 \cdot (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	30
Cloruro de amonio	$\text{NH}_4\text{Cl}$	26
Nitrato de potasio	$\text{KNO}_3$	14

En el mercado existen también mezclas de urea y nitrato de amonio, que son soluciones de N no presurizadas, conocidas como soluciones UAN. Estas mezclas pueden contener desde 30 a 35% de urea, y desde 40 a 43% de  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ , más agua, siendo el % total de N de 28 a 32%. Cada solución tiene una temperatura de cristalización específica, lo cual determina las condiciones de almacenamiento y el momento del año para aplicarlas. Estas soluciones presentan algunas ventajas: a) son fáciles de manipular y aplicar; b) pueden aplicarse más uniformemente que los fertilizantes sólidos; c) algunos pesticidas son compatibles con estas soluciones por lo que pueden ser aplicados conjuntamente. La cantidad de N a aplicar se calcula a partir de la densidad del fertilizante líquido. En general estas mezclas se utilizan en producciones muy intensivas.

Otras fuentes de N de importancia creciente en la producción agrícola son las fuentes de liberación lenta de N, tales como la urea-formaldehído. Este producto contiene 30% de N. Puede ser usado en canchas de golf, plantas ornamentales, cultivos de invernáculo y viveros. Otro producto de lenta liberación es la urea recubierta con azufre. Cada gránulo de urea presenta una cobertura de azufre, siendo la concentración de N del orden de 36-38%. El N se va liberando paulatinamente luego que los microorganismos atacan la cubierta de S.

En Uruguay las fuentes más usadas son las amoniacales, representadas en un 95% por urea y fosfato de amonio, con un amplio predominio de la urea. Por este motivo a continuación se discutirán las transformaciones que sufre esta última en el suelo.

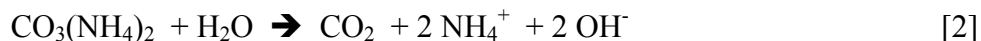
### A. TRANSFORMACIONES DE LA UREA

La urea es un fertilizante de origen sintético. Su fórmula es  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  y contiene 46% de N. Al ser incorporada al suelo sufre un proceso de hidrólisis, formando carbonato de amonio ( $\text{CO}_3(\text{NH}_4)_2$ ).



Esta reacción es catalizada por la enzima ureasa, una enzima que abunda en el suelo. Esto se debe a que la urea es una molécula orgánica relativamente abundante, constituyendo la forma principal de excreción de N en la orina de los mamíferos. Al igual que lo que ocurre para otras enzimas del suelo, una parte de la actividad de la ureasa se localiza dentro de las fracciones humificadas de la MOS, y se considera que los mismos mecanismos que explican la estabilidad del humus explicarían la estabilidad de la ureasa en el suelo. Parte de la ureasa del suelo proviene de los microorganismos; muchos de ellos poseen esta enzima y son capaces de llevar a cabo esta hidrólisis. Los restos frescos en descomposición también aportan ureasa al suelo, aunque la enzima proveniente de estas fuentes se degrada rápidamente por la acción microbiana.

La molécula de  $\text{CO}_3(\text{NH}_4)_2$  producida en [1] es inestable, y se descompone rápidamente en el suelo de acuerdo a la siguiente reacción:



Si existe suficiente humedad en el suelo estas dos reacciones ocurren rápidamente, por lo que generalmente se considera a la urea como un fertilizante amoniacal. Sin embargo, a diferencia de otros fertilizantes nitrogenados, el N de la urea tiene más probabilidades de perderse por volatilización. De acuerdo con la reacción [2], cualquiera sea el pH del suelo, en



la zona de disolución de la urea el pH es siempre alcalino (ver capítulo de Pérdidas por Volatilización de  $\text{NH}_3$ ).

Estas pérdidas pueden existir solamente cuando la urea se aplica en superficie, ya que unos pocos centímetros de suelo sobre el fertilizante son suficientes para retener el  $\text{NH}_3$ . Por lo tanto, la mejor estrategia para reducir las pérdidas de urea es incorporarla al suelo, como se hace normalmente cuando se la aplica a la siembra. En caso de tener que aplicar este fertilizante en la superficie, lo que es común cuando se fertilizan cultivos o pasturas en crecimiento, es conveniente hacerlo en suelos secos. Si el suelo está húmedo, sería preferible aplicarlos en condiciones de baja evapotranspiración, como por ejemplo en días nublados. El mejor momento de aplicar urea en superficie sería antes de una lluvia. En estas condiciones atmosféricas, no sólo la evapotranspiración es baja, sino que además, la lluvia va a incorporar a la urea dentro de los primeros centímetros del suelo. En caso de contar con equipos de riego sería recomendable la aplicación de cierta cantidad de agua para lograr dicho objetivo. Por lo tanto, cuando la urea se aplica en superficie existe la potencialidad de que parte del N se pierda por volatilización. Sin embargo, en la mayoría de las situaciones estas pérdidas no son muy importantes, y si se siguen ciertas normas básicas de manejo, normalmente la mayoría del N de la urea se transforma rápidamente en  $\text{NH}_4^+$ , el cual es retenido por los coloides del suelo.

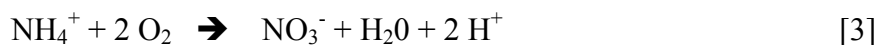
A diferencia de los macronutrientes P y K, en el caso del N puede ser una buena estrategia aplicarlo en forma fraccionada. Debido a la movilidad del N en el suelo, sería deseable aplicarlo en el momento de mayor demanda por parte del cultivo.

### Contenido de Biuret

El biuret ( $\text{NH}_2\text{-CO-NH-CO-NH}_2$ ) es una molécula que se forma durante la síntesis de la urea cuando la temperatura de producción sobrepasa ciertos umbrales. Se forma por la combinación de dos moléculas de urea y la liberación de una molécula de  $\text{NH}_3$ . El contenido de biuret de la urea no es constante, sino que varía apreciablemente de acuerdo a la calidad del proceso de producción. Esta molécula es tóxica para las plantas, y en general se recomienda no usar urea con contenidos de biuret superiores al 1.5-2.0%. En situaciones de producción donde se aplica urea en forma foliar, la sensibilidad de los cultivos aumenta, recomendándose aplicar urea con contenido de biuret inferiores al 0.25%.

## **B. FERTILIZANTES AMONIACALES Y ACIDIFICACIÓN DE LOS SUELOS**

Los fertilizantes amoniacales generan acidez en el suelo ya que al nitrificarse liberan  $\text{H}^+$ . De acuerdo con la reacción [3], por cada molécula de  $\text{NH}_4^+$  que se transforma en  $\text{NO}_3^-$  se producen 2  $\text{H}^+$ .

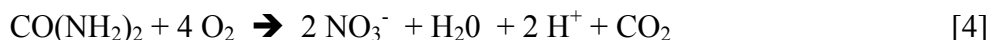


La magnitud de este efecto acidificante depende de varios factores. Uno de ellos es el tipo de suelo. Los suelos de textura más arenosa tienden a acidificarse más rápido que los suelos más arcillosos, debido fundamentalmente a que los primeros tienen menos poder buffer, el cual es función del contenido de MOS y de la capacidad de intercambio catiónico del suelo. Otros factores son el pH original del suelo, la dosis de N aplicada y la frecuencia de aplicación. En términos generales, los casos de descenso importante del pH se han observado en suelos arenosos, de pH original ácido, y cuando se han agregado dosis altas de fertilizantes amoniacales durante muchos años.

Este proceso de acidificación también puede ser causado por la nitrificación de fuentes de N orgánicas. En Australia esto se ha observado en suelos arenosos con muy baja CIC y muy bajo contenido de N. Cuando en estos suelos se instalan pasturas mezclas de gramíneas y leguminosas, luego de algunos años y como resultado de la fijación simbiótica el contenido de N del suelo aumenta. Al laborear estos suelos para hacer agricultura, gran parte del N fijado se convierte en  $\text{NO}_3^-$ , liberando  $\text{H}^+$ . Además, parte de este  $\text{NO}_3^-$  se lava, arrastrando consigo bases intercambiables ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , etc.). Como resultado de este proceso, el pH de estos suelos puede descender considerablemente.

### Residuo ácido

Es un parámetro que aparece en el envase de fertilizantes nitrogenados de otros países (Argentina, por ejemplo). Se distingue un valor máximo, un valor mínimo y un valor oficial. El valor máximo supone que toda la urea se nitrifica en el suelo. De acuerdo con la reacción [4], por cada mol de urea se producen dos moles de  $\text{NO}_3^-$  y dos moles de  $\text{H}^+$ .



Para neutralizar esta acidez, tendríamos que agregar 1 mol de  $\text{CaCO}_3$  (ec.. [5]).



Como conocemos los pesos moleculares y el número de moles de N y de  $\text{CaCO}_3$  que participan en las reacciones [4] y [5], podemos calcular la cantidad de  $\text{CaCO}_3$  necesario para neutralizar 1 kg de N agregado como urea. Para neutralizar  $28 \text{ kg ha}^{-1}$  de N agregado como urea tendríamos que agregar  $100 \text{ kg. ha}^{-1}$  de  $\text{CaCO}_3$ , por lo que el residuo ácido máximo (equivalente  $\text{CaCO}_3$ ) sería  $100/28$  o aproximadamente 3.6. Para calcular el valor mínimo se asume que la urea se absorbe toda como  $\text{NH}_4^+$ , es decir que no se produce nitrificación. En este caso el residuo ácido es cero. El valor oficial (1.8) es el promedio entre el valor máximo y el valor mínimo.

En general, los fertilizantes amoniacales (sulfato de amonio, fosfato di y monoamónico) presentan residuos ácidos mayores que la urea, tanto en sus valores máximos como mínimos. En estos fertilizantes aparecen además otras fuentes de acidez, como son las moléculas de sulfatos y de fosfatos, las cuales actúan en el suelo aún cuando la molécula de  $\text{NH}_4^+$  no sea nitrificada. En cambio otras fuentes nitrogenadas, como  $\text{NO}_3\text{NH}_4$  o amoníaco anhidro ( $\text{NH}_3$ ) tienen residuos ácidos máximos y mínimos iguales a los de la urea. (Tabla 2)

### C. DIFERENCIAS ENTRE FUENTES

En la mayoría de las situaciones de producción generalmente no se observan diferencias en la eficiencia de uso de los fertilizantes nítricos y amoniacales. En estas situaciones, lo que influye en la elección de una u otra fuente es el precio. Actualmente, las fuentes nítricas son aproximadamente tres veces más caras que las amoniacales, por lo que la elección parece clara. Existen, sin embargo, situaciones específicas en las que debe recomendarse el uso de una u otra fuente.

#### 1) Uso de fuentes amoniacales

En cultivos inundados, como por ejemplo en arroz bajo riego, se usan solamente fuentes amoniacales. Si se usaran fuentes nítricas las pérdidas por desnitrificación serían masivas.

#### 2) Uso de fuentes nítricas

Las fuentes nítricas se usan para situaciones específicas, donde la intensidad de la producción y la rentabilidad del producto es muy alta. Ejemplos de estas situaciones son los sistemas de producción de tomate en invernáculo durante el invierno, el cultivo de tabaco y el de cítricos.

Una ventaja de las fuentes nítricas es que no son fuentes de acidez. Por el contrario, debido a que el  $\text{NO}_3^-$  generalmente se absorbe más rápido que el catión acompañante ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ), estas fuentes tienen cierto efecto alcalinizante.

**Tabla 3. Acidez del suelo producida por fertilizantes nitrogenados**

Fuente de N	Reacción de nitrificación	Residuo ácido	Acidez Residual del suelo			
			Máximo		Mínimo	
			Equivalente CaCO <sub>3</sub> kg de CaCO <sub>3</sub> / kg de N	Residuo ácido	Equivalente CaCO <sub>3</sub> kg de CaCO <sub>3</sub> / kg de N	Valor oficial*
Urea	$(\text{NH}_2)_2\text{CO} + 4\text{O}_2 \longrightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{NO}_3^- + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$2\text{H}^+$ $2\text{NO}_3^-$	$100/28 = 3.6$	ninguno	0	1.8
Nitrato de amonio	$\text{NH}_4\text{NO}_3 + 2\text{O}_2 \longrightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O}$	$2\text{H}^+$ $2\text{NO}_3^-$	$100/28 = 3.6$	ninguno	0	1.8
Sulfato de amonio	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + 4\text{O}_2 \longrightarrow 4\text{H}^+ + 2\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O}$	$4\text{H}^+$ $2\text{NO}_3^-$ $\text{SO}_4^{2-}$	$200/28 = 7.2$	$2\text{H}^+$ $\text{SO}_4^{2-}$	$100/28 = 3.6$	5.4
Fosfato diamónico	$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4 + \text{O}_2 \longrightarrow 3\text{H}^+ + 2\text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{PO}_4^- + \text{H}_2\text{O}$	$3\text{H}^+$ $2\text{NO}_3^-$ $\text{H}_2\text{PO}_4^-$	$150/28 = 5.4$	$\text{H}^+$ $\text{H}_2\text{PO}_4^-$	$50/28 = 1.8$	3.6

\* Valor adoptado por la Asociación Oficial de Químicos Analíticos (Pierre, 1934).  
 FUENTE: Adams, Soil Acidity and Liming, no. 12, p. 234. Madison, Wisc.: ASA, 1984.  
 Extraído de Tisdale et al, 1995

### 3) Uso de fuentes mixtas

El uso de fuentes mixtas nítricas y amoniacales, como el  $\text{NO}_3\text{NH}_4$ , podría ser ventajoso cuando se aplica N en cobertura (trigo y cebada en macollaje y maíz en seis hojas). En estas condiciones, el fertilizante queda en la superficie y además, parte del fertilizante cae sobre el cultivo y el rastrojo y no sobre el suelo. Todo esto disminuye las chances de que el  $\text{NH}_4^+$  ó sea retenido por la CIC del suelo. En condiciones de siembra directa existe más rastrojo sobre la superficie, por lo que este problema se acentúa. El hecho de que la mitad del N aplicado esté en forma de  $\text{NO}_3^-$  tendría, al menos teóricamente, algunas ventajas con respecto a aplicar urea en estas condiciones. Una de estas ventajas es que el  $\text{NO}_3^-$  no se pierde por volatilización de  $\text{NH}_3$ . Además, la absorción de N sería más rápida ya que no es necesario esperar que la urea pase a formas minerales. Por último, si existen condiciones de baja luminosidad sería preferible que parte del N fuera absorbido como  $\text{NO}_3^-$  y no como  $\text{NH}_4^+$ . Sin embargo, en nuestro país las evaluaciones realizadas hasta el momento por la Cátedra de Fertilidad de Suelos en cebada, maíz y trigo no muestran diferencias importantes entre la urea y el  $\text{NO}_3\text{NH}_4$ . Cuando éstas existen y son favorables al  $\text{NO}_3\text{NH}_4$ , la diferencia observada en rendimiento no paga la diferencia de precio entre los dos fertilizantes (el  $\text{NO}_3\text{NH}_4$  es 1.5 veces más caro que la urea por kg de N).

De lo anterior se desprende que para lograr altos rendimientos hay que fertilizar con N. Pero para hacer una fertilización racional, hay que además, manejar el N. Esto significa ajustar la oferta de N por parte del suelo con las demandas de N por parte del cultivo. Una oferta insuficiente de N puede ocasionar grandes pérdidas económicas. Un exceso de N, en cambio, puede afectar la calidad del producto, originar pérdidas económicas e incluso provocar problemas en el medio ambiente.

### 4) EFICIENCIA DE USO DEL FERTILIZANTE NITROGENADO

La eficiencia de uso del fertilizante nitrogenado se puede definir como la relación entre los kilogramos de N absorbido proveniente del fertilizante y los kg. de N de fertilizante agregado. Como la absorción de N depende del crecimiento del cultivo, la cantidad de N absorbido proveniente del fertilizante generalmente se determina en madurez fisiológica, el momento de máxima absorción. Los valores de eficiencia obtenidos dependen del cultivo y del momento de aplicación del fertilizante, pero estos generalmente oscilan entre el 50 y el 70%. Una parte del N no absorbido permanece en el suelo en forma orgánica, y en menor cantidad en forma mineral. El resto del N se pierde del sistema suelo-planta por los procesos previamente descriptos.

## 5. N EN EL CRECIMIENTO VEGETAL

De todos los elementos químicos esenciales, el N es el nutriente que tiene efectos más espectaculares sobre el crecimiento de la planta.

### I. FUNCIÓN DEL N EN LA PLANTA

El N cumple funciones vitales dentro de los seres vivos, encontrándose dentro de las plantas tanto en formas orgánicas como inorgánicas. Estas últimas son en realidad de escasa magnitud, estando la mayoría como  $\text{NO}_3^-$ , única forma inorgánica capaz de ser almacenada. Por lo tanto, dentro de la planta la mayoría del N se encuentra en forma orgánica. Este nutriente juega un rol esencial en el crecimiento del vegetal, ya que es constituyente de moléculas como: i) clorofila; ii) aminoácidos esenciales; iii) proteínas; iv) enzimas; v) nucleoproteínas; vi) hormonas; vii) trifosfato de adenosina (ATP). Además, el N es esencial en muchos procesos metabólicos, como por ejemplo, la utilización de los carbohidratos.

### II. ¿CUÁNTO N REQUIEREN LAS PLANTAS?

Las plantas requieren N en muy altas cantidades, sólo comparables a las de K. En la Tabla 1 se pueden comparar las cantidades de los macronutrientes nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) consumidas por distintos cultivos según su producción de materia seca.

**Tabla 4. Contenido de N, P y K según la cantidad de materia seca producida por distintos cultivos**

CULTIVO	MS	N	P	K
	Ton.ha <sup>-1</sup>	-----kg.ha <sup>-1</sup> -----		
Campo natural	2-4	50	5	36
Trébol blanco – Festuca	10	290	35	270
Alfalfa	10	320	30	280
Avena – Raigrás	7	180	15	165
Maíz	12	275	40	230
Trigo	5	170	22	102
Tomate invernáculo (fruto)	250	700	80	1100

Cuando el rendimiento de un cultivo se incrementa, las cantidades de nutrientes que éste demanda también aumentan. Sin embargo, no todos los nutrientes son demandados en forma proporcional al aumento de su rendimiento. Como puede observarse en la Tabla 4, cuando el rendimiento del cultivo de maíz se duplica, las cantidades de N que el mismo debe absorber también se incrementan. En cambio el K, aunque también es requerido en grandes cantidades, se incrementa en un porcentaje menor.

Los contenidos de N en la planta expresados en relación a su peso seco total generalmente oscilan entre 1 y 5%. En general, los tejidos jóvenes tienen concentraciones mayores de N, y las plantas leguminosas tienen concentraciones mayores que las gramíneas. Por ejemplo, en un ensayo de evaluación de coberturas de invierno (trigo, cebada, avena y triticale) realizado por Zamalvide et al., 1998 (no publicado), se midió el contenido de N en la materia seca de estos cultivos en distintas etapas de crecimiento. El contenido de N promedio para todos los cultivos cortados a los 60 días de sembrados fue cercano al 2.5% de N, disminuyendo a medida que los cultivos llegaban a su etapa de fructificación (1% N), a los 120 días de sembrados. Cultivos de leguminosas como alfalfa y lotus pueden contener alrededor de 3% y 2% de N, respectivamente. Estos contenidos de N están referidos a la materia seca de toda la parte aérea de las plantas muestreadas al inicio de la floración.

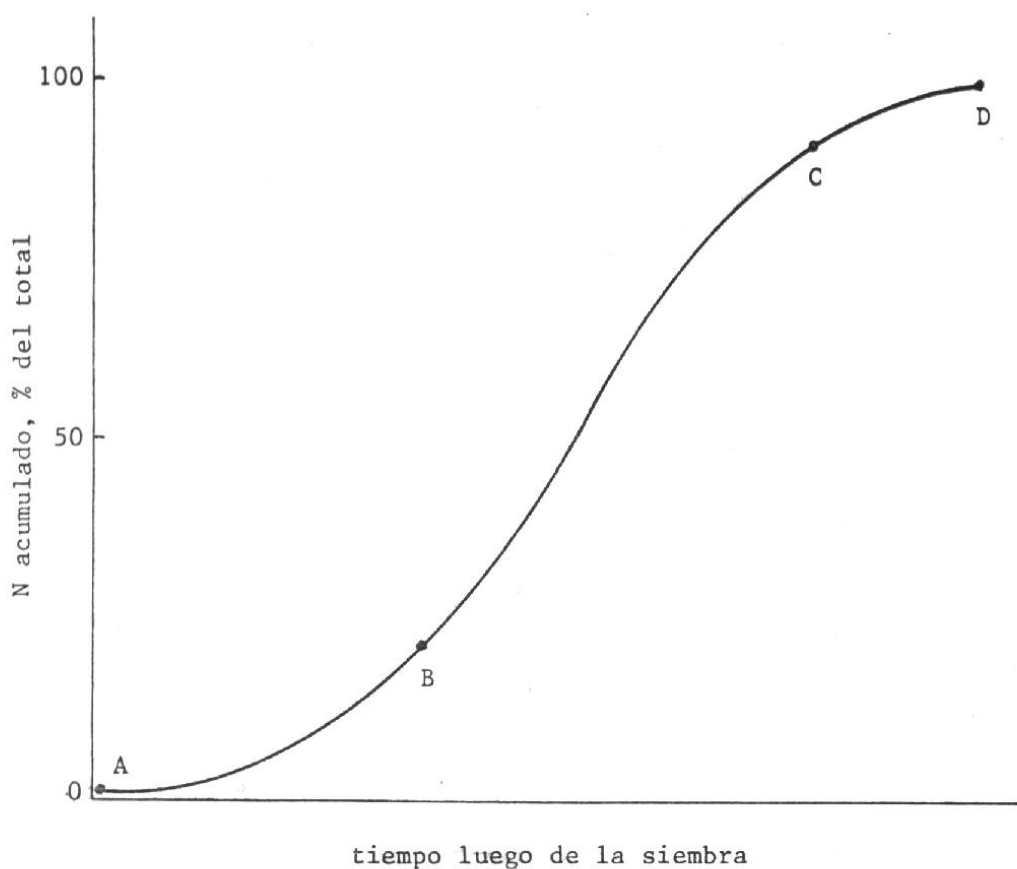
**Tabla 5. Rendimiento en grano y paja de un cultivo de maíz y las cantidades de N, P, K y S consumidas.**

GRANO	PAJA	N	P	K	S
----- kg/ha-----					
1.000	1.000	25			
5.300	4.600	78	14,2	148	10,2
8.400	5.200	127	19,9	200	13,0
9.800	5.900	187	28,3	235	15,1
9.700	6.800	200	22,1	245	17,1
12.000	9.700	275	40,0	270	

La acumulación de N en la planta en función del tiempo sigue una curva sigmoide (Figura 17) donde la acumulación al principio es escasa porque la planta recién se está desarrollando. Luego ocurre una etapa de máxima absorción de N que corresponde al período de activo crecimiento. Finalmente, la tasa de absorción de N se reduce. Las tasas de absorción y la duración de cada una de estas etapas dependen de factores tales como especie, variedad, manejo, etc. Una curva sigmoide similar a la Figura 17 se obtiene cuando se relaciona la

producción de materia seca de un cultivo en función del tiempo. Las diferencias entre ambas curvas es que la acumulación de N antecede a la acumulación de MS.

En condiciones de riego y fertilización, Andrade et al, 1996, citado por Uhart y Echeverría, 1997, encontraron que en cultivos de maíz que absorbían entre 240 y 320 kg. ha<sup>-1</sup> totales de N, las tasas máximas de absorción en el período de rápido crecimiento pueden variar entre 2.7 y 3.7 kg. ha<sup>-1</sup>. día<sup>-1</sup>. Según estos autores, la tasa máxima absorción ocurre en el período entre V5 y R4-R5, o sea entre los 25 y los 120 días después de la emergencia (Figura 18).



**Figura 17. Curva teórica de la acumulación del N en la planta a través de su ciclo de crecimiento.**



### III. FORMAS QUÍMICAS EN QUE EL N ES ABSORBIDO POR LAS PLANTAS

Las plantas pueden absorber N como  $\text{NO}_3^-$  o  $\text{NH}_4^+$ . Como en la mayoría de los suelos las condiciones permiten la acción de las bacterias nitrificantes, normalmente la mayoría de los cultivos absorben la mayor parte de su N como  $\text{NO}_3^-$ . Sin embargo, en situaciones específicas, como por ejemplo en condiciones anaeróbicas o inmediatamente a la aplicación de fertilizantes amoniacales, las plantas pueden absorber relativamente más  $\text{NH}_4^+$  que  $\text{NO}_3^-$ . La absorción de N como  $\text{NH}_4^+$  también puede ocurrir en la etapa temprana del crecimiento ya que ésta se produce cuando las temperaturas son aún bajas para que se produzca una rápida nitrificación. Al avanzar el estado de crecimiento la planta absorbe paulatinamente más  $\text{NO}_3^-$ . En algunos casos las plantas también absorben N bajo forma de urea.

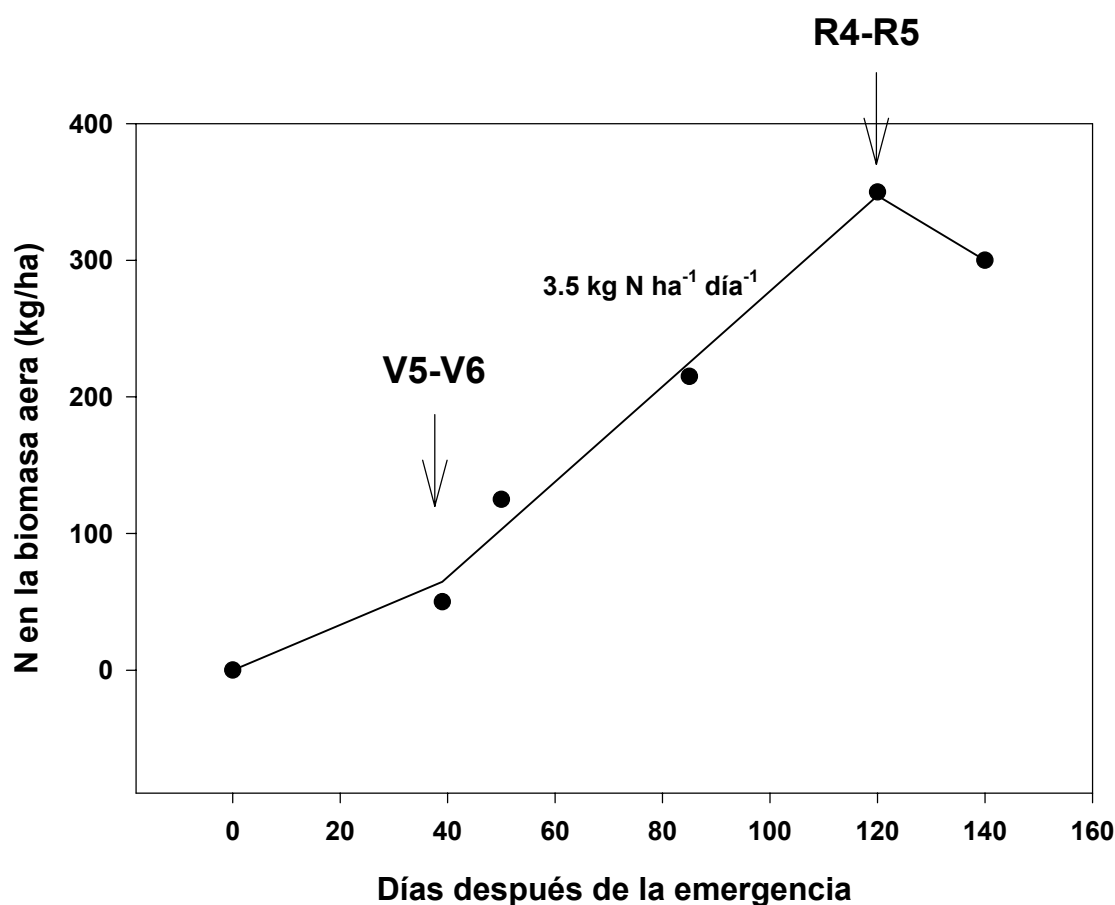


Figura 18. Acumulación de N en la biomasa aérea del Maíz en función del tiempo. Andrade et al, 1996.

En presencia de ambas formas de N, la preferencia de las plantas por una u otra forma varía según la especie. Algunas plantas, como por ejemplo los cereales, absorben N independientemente de la forma en que éste se encuentre, mientras que otras parecen haberse adaptado a una forma determinada de N. Las solanáceas (por ejemplo, tomate, tabaco) se ven favorecidas por una relación  $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$  más alta. El arroz es un ejemplo de un cultivo adaptado a la absorción de N como  $\text{NH}_4^+$ , existiendo algunos cultivares que parecen no tolerar la presencia de  $\text{NO}_3^-$  (Tisdale et al, 1995). Otras especies adaptadas a la nutrición con  $\text{NH}_4^+$  son aquellas que crecen en suelos ácidos de regiones tropicales y subtropicales, donde el proceso de nitrificación se ve reducido. Incluso se ha detectado que las raíces de estas especies excretan inhibidores de la nitrificación.

Existen trabajos que indican que algunas plantas agrícolas crecen mejor si se les suministra una mezcla de  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$ . En especial se ha detectado que algunas plantas no sólo pueden producir mayor nivel de rendimiento sino también mayor nivel de proteína. En la literatura aparecen ejemplos de esta respuesta positiva a ambas fuentes en cultivos de maíz y trigo.

#### **A. ABSORCIÓN Y ASIMILACIÓN DE $\text{NO}_3^-$**

El proceso de absorción de  $\text{NO}_3^-$  es activo, con gasto de energía, requiriendo la presencia de enzimas especiales, como lo son las  $\text{NO}_3^-$  permeasas. Éstas catalizan el pasaje de los iones  $\text{NO}_3^-$  a través de las membranas celulares, sobre todo a nivel de los pelos radiculares. Para este proceso, por lo tanto, la planta necesita haber sintetizado compuestos energéticos. La temperatura del suelo también afecta la absorción de  $\text{NO}_3^-$ , siendo ésta menor a temperaturas bajas. En suelos que tienen un pH bajo a medio este proceso es máximo, inhibiéndose cuando la concentración de  $\text{NH}_4^+$  es alta. La absorción también está afectada por el Mo, ya que se forma una molibdo proteína en la superficie de las células de la raíz, para el transporte de  $\text{NO}_3^-$  (Viet y Hodges, 1971, citados por Stevenson, 1982).

Cuando la planta absorbe grandes cantidades de  $\text{NO}_3^-$ , también aumenta la síntesis de ácidos orgánicos, lo cual se asocia con una acumulación de cationes inorgánicos (Ca, Mg y K). El medio circundante a los pelos radiculares se vuelve alcalino y las raíces liberan  $\text{HCO}_3^-$  para mantener tanto la solución del suelo como el interior de la planta eléctricamente neutra.

Una vez que el  $\text{NO}_3^-$  ha sido absorbido por la planta, puede ser almacenado como tal por los tejidos radiculares, o reducido y sintetizado en aminoácidos, o depositado en el xilema para ser transportado por los tallos. En los tallos y pecíolos puede existir tanto aminoácidos como  $\text{NO}_3^-$ ; éste puede ser almacenado temporariamente o moverse hacia las hojas para ser almacenado allí o reducirse. Finalmente, los aminoácidos provenientes de cualquiera de estos lugares de almacenamiento pueden ser depositados en el floema para luego ser translocados a partes reproductivas o de activo crecimiento. Incluso parte de estos aminoácidos puede volver a las raíces.

La asimilación de  $\text{NO}_3^-$  se realiza a través de una serie de etapas. Primero, el  $\text{NO}_3^-$  se reduce a  $\text{NO}_2^-$  requiriéndose de la acción de enzimas como  $\text{NO}_3^-$  reductasa y de la presencia de fotosintatos. Se ha estimado que por cada molécula de  $\text{NO}_3^-$  que se reduce se requieren dos de NADH. Luego, ese  $\text{NO}_2^-$  se reduce a  $\text{NH}_3$ , por la acción de la nitrito reductasa. El  $\text{NH}_3$  obtenido es rápidamente incorporado a ácido glutámico por acción de la glutamina sintetasa y glutamato sintasa, ubicadas tanto dentro de las células, como fuera de ellas.

## B. ABSORCIÓN Y ASIMILACIÓN DE $\text{NH}_4^+$

La absorción de  $\text{NH}_4^+$ , contrariamente a la de  $\text{NO}_3^-$ , se cumple a través de un proceso activo y otro pasivo. En experimentos donde se han utilizado inhibidores metabólicos en plantas de tomate, se ha demostrado que cuando se inhibe la liberación de energía respiratoria la absorción de  $\text{NH}_4^+$  se reduce a la mitad, pero ésta no se inhibe completamente, como es el caso de la absorción de  $\text{NO}_3^-$ .

Los factores del ambiente que afectan la absorción de  $\text{NH}_4^+$  son similares a los que afectan la absorción de  $\text{NO}_3^-$ . Sin embargo, la tasa de absorción de  $\text{NH}_4^+$  es máxima a valores de pH cercanos a 8. Las bajas temperaturas disminuyen el proceso, pero en forma menos marcada que en el caso de la absorción de  $\text{NO}_3^-$ . La absorción de  $\text{NH}_4^+$  produce un incremento de la absorción de aniones inorgánicos ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$ ), y el pH de la rizósfera puede decrecer debido a la liberación de  $\text{H}^+$  por la raíz para mantener la neutralidad eléctrica.

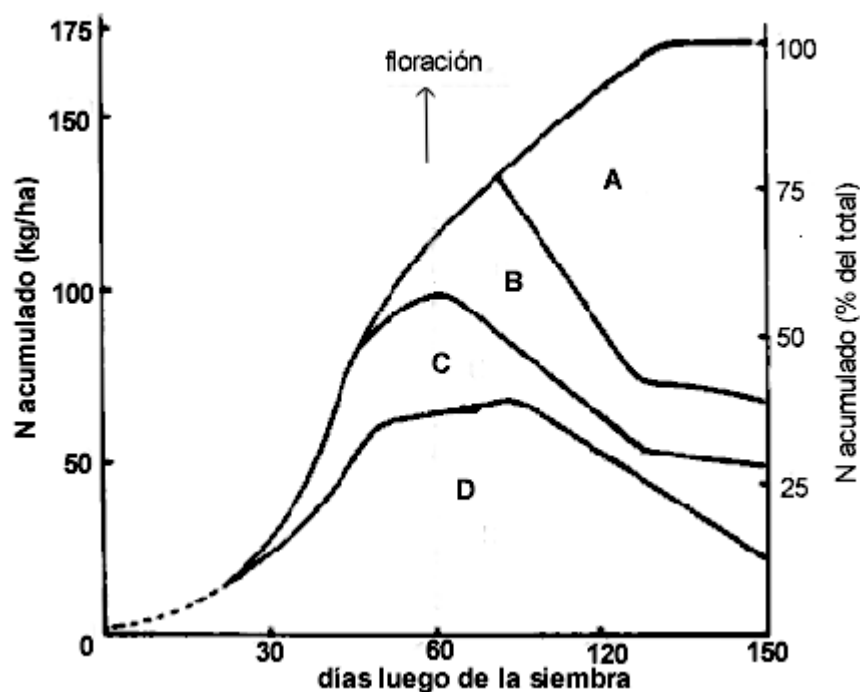
A pesar de que el  $\text{NH}_4^+$  puede ser absorbido por un proceso pasivo, la tasa de absorción de  $\text{NH}_4^+$  depende más que la del  $\text{NO}_3^-$  del suministro de energía. Esto se debe a que una vez que es absorbido, el  $\text{NH}_4^+$  debe ser incorporado inmediatamente a los esqueletos carbonados. Si no existen carbohidratos disponibles para este proceso, el  $\text{NH}_4^+$  puede acumularse a niveles tóxicos dentro de la raíz. Esto produce detención del crecimiento y reducción de la absorción de K, con síntomas de deficiencia de este nutriente en la planta. Generalmente las plantas no transportan  $\text{NH}_4^+$  por el xilema, sino que el  $\text{NH}_4^+$  absorbido es transformado o asimilado en las raíces y luego transportado en forma de compuestos orgánicos aminados. Sin embargo, existen reportes que indican que el  $\text{NH}_4^+$  también puede ser asimilado en las hojas. El  $\text{NO}_3^-$ , en cambio, no es tóxico dentro de la planta y puede almacenarse en grandes cantidades, siendo luego translocado como tal, sin necesidad de reducción previa.

Una vez absorbido, el  $\text{NH}_4^+$  no requiere ser reducido, por lo que con relación al  $\text{NO}_3^-$  existiría un ahorro de energía por parte de la planta. Sin embargo, en algunas situaciones este costo energético podría no ser importante. Cuando el  $\text{NO}_3^-$  es reducido en la hoja, la energía que se utiliza para el proceso de reducción proviene directamente de la energía solar, y no supone utilización de carbohidratos como fuente de energía. Debido a que la energía solar disponible excede la energía requerida para reducir los carbohidratos, no existe competencia por energía dentro de la planta para la producción de carbohidratos o la reducción de  $\text{NO}_3^-$ .

Solamente cuando el  $\text{NO}_3^-$  es reducido en la raíz, la energía utilizada por la planta para este proceso proviene del catabolismo de los carbohidratos. Por lo tanto, el costo energético de reducir  $\text{NO}_3^-$  a  $\text{NH}_4^+$  es función de la proporción de  $\text{NO}_3^-$  que es reducido en la raíz en relación al  $\text{NO}_3^-$  que es reducido en las hojas (Hageman, 1984).

#### IV. TRANSLOCACIÓN DE N

Dentro de la planta el N es muy móvil, por lo cual la planta lo puede redistribuir o translocar. A medida que el cultivo envejece, parte del N (partes orgánicas) de las áreas vegetativas se mueve hacia las semillas. Este proceso ocurre en forma independiente de la magnitud del suministro del N que el cultivo esté recibiendo desde el suelo (Figura 19).



**Figura 19. Acumulación y distribución de N dentro de la planta de maíz en función del tiempo A: grano, B: marlo y envolturas, C: tallo y panojas, D: hojas.**

Sin embargo, si el cultivo dispone de una adecuada cantidad de N en las últimas etapas de su ciclo, la actividad fotosintética de la parte vegetativa tendrá una duración mayor, acumulándose más materia seca. Por lo tanto, la concentración de N total en las hojas es

mayor cuando la planta se encuentra en la fase vegetativa que cuando se encuentra en la etapa de fructificación.

## V. EFECTOS DEL N EN LA PLANTA

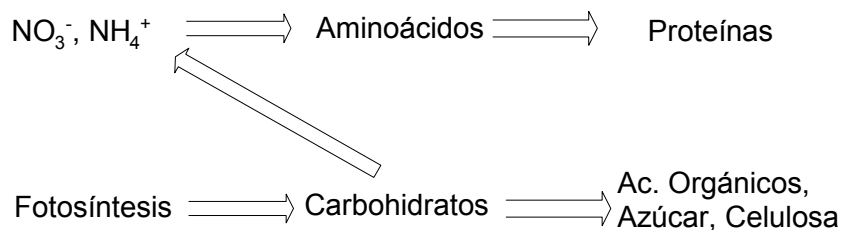
### A. SÍNTOMAS DE DEFICIENCIA DE N

Cuando existe una deficiencia de N las hojas son pequeñas, los tallos finos y rectos y las ramificaciones escasas; de ahí que la planta parezca rala. En las primeras etapas de crecimiento las hojas suelen ser pálidas y de color verde-amarillento. Esto se debe a la poca síntesis de clorofila. A medida que la planta envejece las hojas pueden tornarse amarillas, rojas o púrpuras debido a la presencia de antocianina.

En condiciones de deficiencia de N se produce una competencia interna dentro de la planta que determina la movilización del N desde los órganos de mayor edad cronológica (por ejemplo, hojas viejas) hacia los órganos más jóvenes. Si la planta se encuentra en la fase reproductiva, el N es translocado preferentemente hacia los frutos. Esto determina que los síntomas de deficiencia de N aparezcan en las hojas más viejas. Por esto, generalmente las hojas basales se tornan amarillentas. Incluso se ha sugerido que esta característica de las plantas sea utilizada para cuantificar el nivel de deficiencia de N que ha sufrido el cultivo de maíz (Binford y Blackmer, 1993). Estos síntomas de deficiencia son comunes a la mayoría de los cultivos, pero cada especie manifiesta además síntomas específicos.

### B. COMPETENCIA POR CARBOHIDRATOS

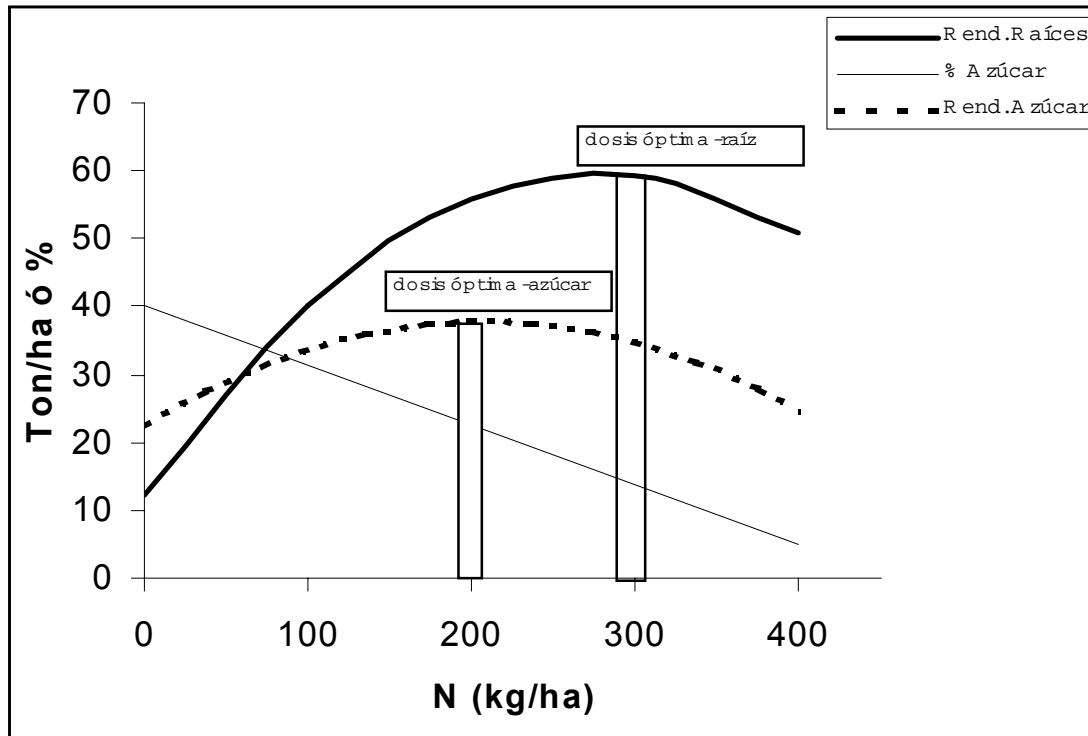
Como resultado de la actividad fotosintética la planta produce carbohidratos que pueden acumularse y constituir ácidos orgánicos, azúcares, celulosa, etc. A su vez, parte de estos carbohidratos se combinan con el N absorbido y forman proteínas y aminoácidos. Por lo tanto, siempre existe dentro de la planta una competencia interna por el destino de estos carbohidratos producidos.



Estos principios generales se manifiestan en distintos cultivos con características específicas:

### 1) Efectos sobre el contenido de azúcar

Este principio general tiene consecuencias prácticas importantes en cultivos productores de azúcar, como remolacha o caña azucarera. En valor de estos cultivos no sólo se mide por el rendimiento físico del material vegetal que se cosecha, sino que además importa la calidad del mismo. Esta calidad generalmente se mide en función del contenido de azúcar de la raíz o la caña. El producto entre la cantidad y la calidad determina el parámetro de interés, el rendimiento de azúcar.



**Figura 20. Respuesta teórica de la producción de materia seca, contenido de azúcar y rendimiento de azúcar de raíces de remolacha azucarera a la dosis de N aplicada.**

Cuando los cultivos tienen bajo suministro de N, generalmente se reduce el rendimiento, pero el material cosechado tiene un alto contenido de azúcar. En cambio, si hay grandes disponibilidades de N en el suelo, normalmente se obtiene un alto rendimiento físico de un producto con bajo contenido de azúcar, afectando así la calidad. Esto determina que en estos cultivos la dosis óptima de N para la producción de azúcar es menor a la dosis óptima requerida para la producción de raíz o caña (Figura 20).

El contenido de azúcar del producto agrícola es también importante en cultivos de uva destinados a la producción de vino. Cuanto más azúcar tenga la uva, mayor será el contenido de alcohol producido en la fermentación, lo que está relacionado a la calidad del vino. Por

esto, los vinos de alta calidad se producen con uva de viñedos instalados en suelos pobres en materia orgánica, donde la producción de uva es escasa pero con un alto contenido de azúcar.

En nuestro país el tenor de azúcar de todos estos cultivos está afectado también por la disponibilidad de agua en el suelo. La ocurrencia de períodos secos en la etapa reproductiva provocan que las plantas detengan su crecimiento y acumulen azúcar, contrariamente a lo que sucede con períodos lluviosos en la misma etapa.

## **2) N y calidad en cebada cervecera**

Otro cultivo en donde el suministro de N afecta la calidad del producto es en la cebada cervecera. Para la producción de cerveza, la industria requiere cebada con ciertos contenidos de proteína. Fuera de este rango, el grano se destina a ración, cambiando también drásticamente el precio que obtiene el productor. Obviamente, una alta disponibilidad de N en el suelo aumenta el contenido de proteína del grano. Por otro lado, un suministro deficiente de N provoca un bajo rendimiento de grano, afectando también la rentabilidad del cultivo. Por esto, en este cultivo es particularmente importante ajustar la fertilización nitrogenada en función del nivel de aporte de N del suelo (Figura 21).

## **3) N y calidad en trigo**

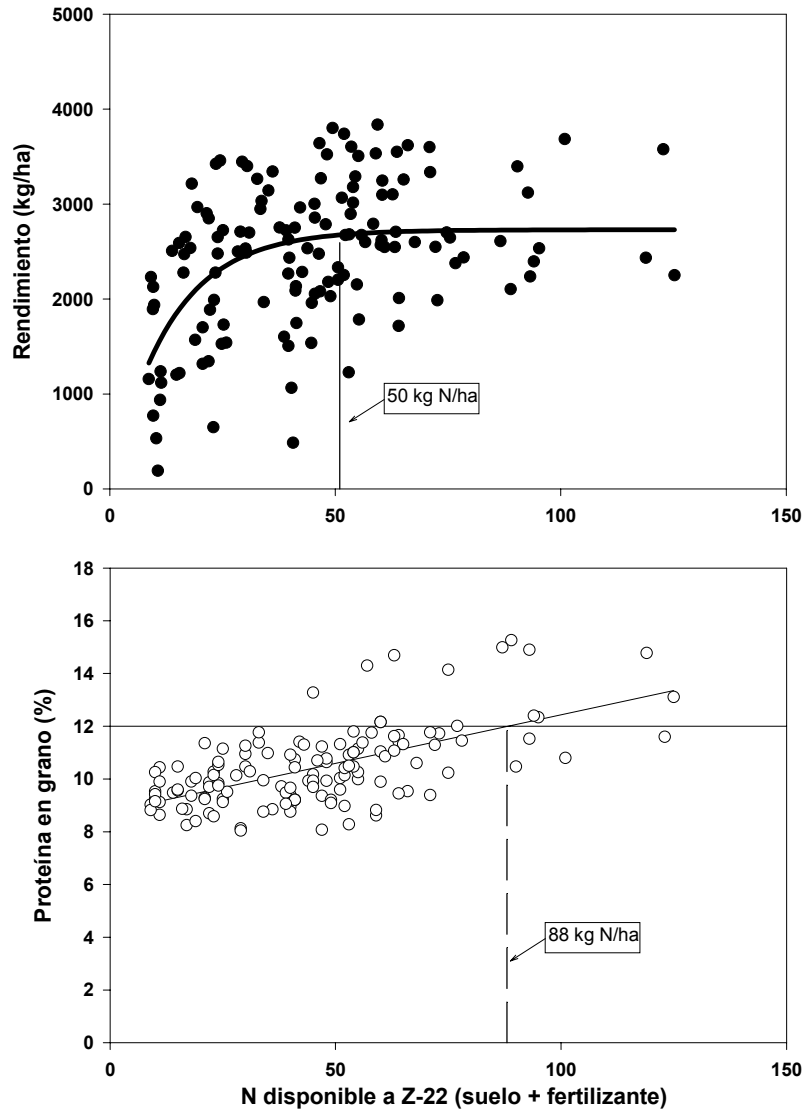
A diferencia de la cebada, en el cultivo de trigo se busca un grano con alto contenido de proteína. Esto se debe a que la calidad panadera de la harina se resiente cuando el contenido proteico de la misma es baja, disminuyendo la elasticidad de la masa y su capacidad de "crecer" o leudar. En el Uruguay a partir de 1998, existe una nueva norma de comercialización que incluye en su base el nivel proteico del grano por lo que el precio que recibe el productor por el trigo depende del contenido de proteína. Por lo tanto, también en este cultivo el manejo de la fertilización nitrogenada afecta la calidad y el precio del producto.

Es reconocida la importancia del "efecto variedad" sobre los parámetros de calidad del trigo y de la harina, así como también de las dosis y momento de fertilización nitrogenada. Tomando el porcentaje de proteína en grano como estimador de la calidad, es de esperar que este sea modificado por todas aquellas variables que alteren el balance entre la oferta del nutriente y la demanda del cultivo

## **4) Relación crecimiento vegetativo- crecimiento reproductivo**

Si la absorción de N del suelo excede la capacidad de la planta de producir carbohidratos, se produce un desbalance interno, ya que se tiene que destinar una gran proporción de los carbohidratos en formar compuestos nitrogenados. Exteriormente, esta reacción se manifiesta muchas veces en un exceso de desarrollo vegetativo, con producción de muchas hojas verdes, fenómeno conocido vulgarmente con la expresión "la planta se va en vicio". Esto puede ocasionar que se alargue la fase vegetativa en desmedro de la fase

reproductiva. Tales problemas pueden acentuarse aún más si las plantas están absorbiendo N en forma amoniacal.



**Figura 21.** Relación entre la cantidad de N disponible en Z22 y el rendimiento y el contenido de proteína de cebada cervecera. Información de ensayos de fertilización nitrogenada realizados en los años 1996 y 97 por la Facultad de Agronomía (Perdomo, C., Hoffman, E., Pons, C. y Pastorini, M.), no publicada.



### **5) Efectos de la absorción de N como $\text{NH}_4^+$ o $\text{NO}_3^-$**

Como ya fue discutido, las plantas son incapaces de almacenar  $\text{NH}_4^+$ , y su acumulación resulta tóxica. Por lo tanto, todo el N absorbido en esta forma tiene que ser rápidamente detoxificado, esto es, combinado con carbohidratos para producir proteínas. Si la planta absorbe mucho  $\text{NH}_4^+$ , ésta tiene que usar una alta proporción de los carbohidratos producidos por la fotosíntesis para formar aminoácidos y proteínas. Cuando las plantas absorben N como  $\text{NO}_3^-$ , en cambio, estos problemas no son tan acentuados. Esto se debe a que las plantas pueden almacenar grandes cantidades del  $\text{NO}_3^-$  absorbido hasta que las condiciones ambientales sean más favorables para su uso.

### **6) Efectos del N sobre la fructificación**

En algunos cultivos hortícolas, como por ejemplo en tomate de invernáculo, pueden ocurrir situaciones extremas de competencia por carbohidratos. Estos problemas aparecen generalmente en invierno, donde debido a la baja alofanía y a las bajas temperaturas, la producción de carbohidratos disminuye. Cuando se aplican altas dosis de N con fuentes amoniacales, la planta tiende a seguir desarrollando área foliar y reducir la producción de frutos, llegando en algunos casos a abortar flores. Este problema se puede subsanar o evitar utilizando dosis bajas de N, aplicando fuentes nítricas o usando tecnologías como el fertirriego, donde es posible fertilizar muy ajustadamente, aplicando N sólo en los momentos más adecuados. Cuando llega la primavera la tasa de fotosíntesis aumenta y este problema deja de ser crítico.

## **C. SUCULENCIA Y DUREZA**

Cuando todos los factores de crecimiento están en niveles óptimos, la planta incorpora una mayor proporción de los hidratos de carbono a su protoplasma que a la constitución de paredes celulares. En estas circunstancias, las células presentan un protoplasma grande y rico en agua, las paredes celulares son finas, y la planta tiene un aspecto suculento. Esto ocasiona que los tejidos estructurales se tornen más finos y por lo tanto más débiles, lo cual puede provocar problemas de vuelco en cereales. En cultivos productores de fibra como el algodón, un exceso de N ocasiona una menor fortaleza de las fibras. El aumento de la succulencia con el suministro de N tiene consecuencias en la susceptibilidad al vuelco, la resistencia a enfermedades y la resistencia al frío de las plantas.

## **D. DAÑOS POR BAJAS TEMPERATURAS**

El aumento del suministro de N promueve el crecimiento vegetativo, lo que lleva a una reducción del contenido de azúcar y otros carbohidratos en la planta. En general, las plantas con bajos niveles de azúcares son más susceptibles a los daños causados por las bajas temperaturas (necrosis de tejidos por congelamiento). Sin embargo, la razón última de este fenómeno no se conoce completamente.

### **E. INCIDENCIA DE ENFERMEDADES**

El aumento del nivel de suministro de N puede afectar la incidencia de enfermedades tanto de modo positivo como negativo, y este cambio puede ser provocado por efectos directos o indirectos. Un ejemplo de efecto directo es la mayor susceptibilidad de las plantas suculentas a la penetración y al desarrollo de ciertas enfermedades de hongos y bacterias. Un ejemplo de efectos indirectos es el aumento de la humedad relativa que se produce en el entorno de cultivos con crecimiento exuberante, lo que favorece el grado de infección de las enfermedades cuyos gérmenes son transportados por el aire, como en el caso de ciertos hongos y royas. Un caso extremo de aumento de humedad relativa relacionado al nivel de suministro de N se produce en las plantas volcadas. El aumento del suministro de N también puede reducir la incidencia de enfermedades. Es el caso de enfermedades que atacan el sistema radicular, como el gusano de la raíz del maíz, habiéndose verificado que las plantas de maíz fertilizadas con N puedan eludir esta enfermedad por mayor producción de raíces. Existen además reportes de que el aumento del suministro de N puede aumentar la concentración en las plantas de sustancias tóxicas para los microorganismos patógenos. Como ejemplo de este comportamiento se cita en la bibliografía el caso de la roya del trigo (*Puccinia glumarum*).

### **F. EFECTO DEL N SOBRE LA MADURACIÓN**

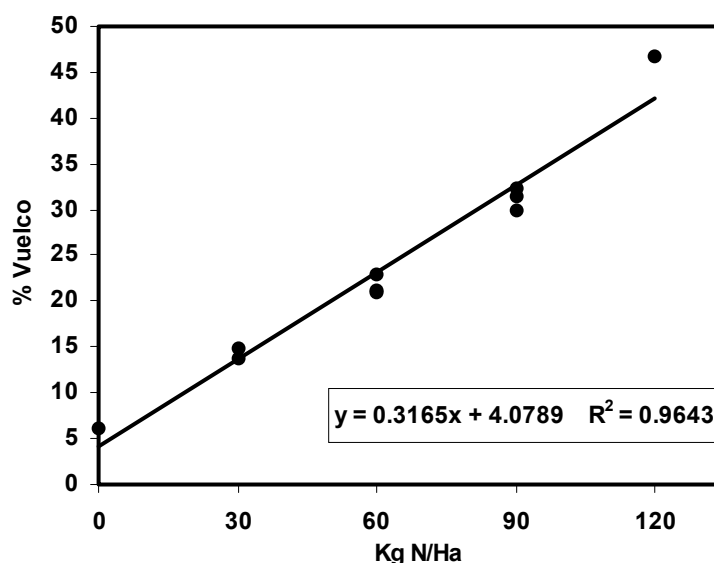
La aplicación de altas dosis de N generalmente alarga el ciclo vegetativo de los cultivos. Esto se debe en parte a que en condiciones de alto suministro de N se desvían carbohidratos hacia el crecimiento vegetativo y se retarda la senescencia de las hojas. En general se ha observado que la dosis de N interacciona con el momento de aplicación, cuando más tarde se aplica una misma dosis de N mayor es el efecto de retraso en la maduración que se observa. En cambio, cuando se parte de situaciones de gran deficiencia de N, la aplicación de dosis moderadas de este nutriente puede acortar el ciclo del cultivo. La explicación de este fenómeno parece relacionarse con la formación más acelerada de ciertos compuestos orgánicos.

### **G. COMPETENCIA ENTRE ESPECIES**

En pasturas mezclas de gramíneas y leguminosas, el nivel de N disponible en el suelo puede determinar, en gran parte, la composición de la mezcla. En situaciones de baja disponibilidad de N, se favorece la fracción leguminosa, ya que ésta puede obtener el N en forma simbiótica. Parte de ese N fijado va a ser transferido a la fracción gramínea, beneficiándose así la producción total de la pastura. En condiciones de altos suministros de N, en cambio, se favorece la fracción gramínea, provocando un mayor crecimiento relativo de esta especie, la cual está adaptada a competir mejor por los recursos luz y agua. Además, en esta situación también se inhibe el proceso de fijación simbiótica.

## H. VUELCO

El vuelco es el desplazamiento inelástico de la planta desde su posición normal a otra determinada por el viento, la altura y el peso de la planta. El aumento de la susceptibilidad al vuelco asociada al suministro de N en algunas especies de cereales se debe a varios efectos del N dentro de la planta. Por un lado, se aumenta la altura, peso y área foliar. Al aumentar el suministro de N también se aumenta el macollaje y con esto se produce mayor número de tallos, pero más finos y de menor diámetro. Por otro lado, al aumentar el suministro de N se reduce el espesor de las paredes celulares (Figura 22).



**Figura 22.** Relación entre el porcentaje de vuelco y el N total agregado en cebada. El porcentaje de vuelco representa el promedio de 23 ensayos de fertilización nitrogenada realizados en los años 1996 y 97 por la Facultad de Agronomía (Perdomo, C., Hoffman, E., Pons, C. y Pastorini, M.). Información no publicada.

## I. RELACIÓN GRANO/PAJA EN CEREALES

En cereales, el máximo cociente grano/paja se obtiene en situaciones de deficiencia de N. Al aumentar la disponibilidad de N esta relación disminuye. Este principio general se cumple dentro de los límites de interés en cuanto a condiciones de suministro de este nutriente, ya que en situaciones de extrema deficiencia el cultivo no formará grano.

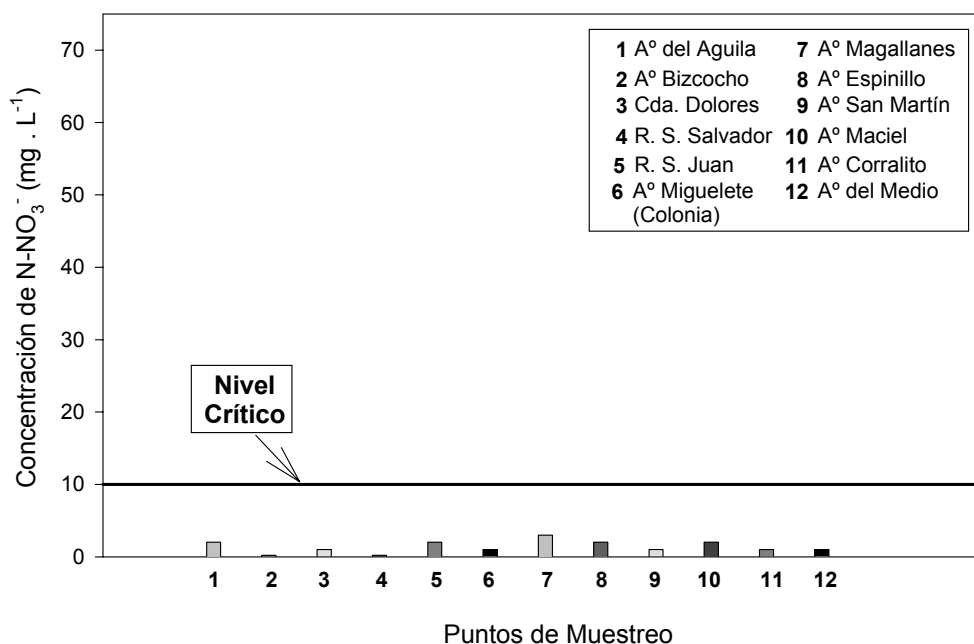
## 6. N y PROBLEMAS AMBIENTALES

### I. TOXICIDAD POR $\text{NO}_3^-$

El  $\text{NO}_3^-$  de por sí no es fuertemente tóxico para los humanos. Sin embargo, el efecto tóxico derivado de la ingesta de alimentos o de aguas ricas en esta forma de N lo produce el  $\text{NO}_2^-$ ; el  $\text{NO}_3^-$  se reduce a  $\text{NO}_2^-$  en el estómago de algunos animales, especialmente en el de los rumiantes, y de los humanos durante los primeros meses de vida. En el adulto normal el estómago y la primera parte del intestino delgado son prácticamente estériles debido al bajo pH y el  $\text{NO}_3^-$  se absorbe antes de ser reducido a  $\text{NO}_2^-$ . Sin embargo en los lactantes el pH del estómago es más básico y permite el desarrollo de una microflora más abundante que es capaz de reducir el  $\text{NO}_3^-$  a  $\text{NO}_2^-$ , lo que explica la mayor sensibilidad de los niños al nitrato. Luego el  $\text{NO}_2^-$  es absorbido y transportado a la corriente sanguínea, donde oxida el  $\text{Fe}^{2+}$  de la hemoglobina a  $\text{Fe}^{3+}$ , formando de esta manera metahemoglobina, la cual no puede transportar  $\text{O}_2$ . Debido a la falta de  $\text{O}_2$  la piel del bebe adquiere una coloración azul, por lo cual a esta enfermedad también se la conoce con el nombre de "enfermedad del bebe azul". Los síntomas clínicos (coloración azul) se producen cuando el 10% de la hemoglobina pasa a metahemoglobina, y los efectos letales ocurren luego de que el 50% ó más de la hemoglobina es transformada. En contraste con la situación de los humanos, los rumiantes, especialmente las vacas, son más susceptibles a la intoxicación con  $\text{NO}_3^-$ . Esto se debe a que estos mamíferos tienen una importante microflora en el rumen particularmente hábil para reducir el  $\text{NO}_3^-$  a  $\text{NO}_2^-$ .

En EEUU, la mayoría de los casos de toxicidad por  $\text{NO}_3^-$  se han producido por consumo de agua de pozo con contenidos elevados de  $\text{NO}_3^-$ . Debido a este riesgo de toxicidad, actualmente los organismos de salud pública de EEUU, la ONU y muchos países han adoptado como estándar una concentración de 10 mg.  $\text{L}^{-1}$  de N- $\text{NO}_3^-$  (ó 44 mg.  $\text{L}^{-1}$  de  $\text{NO}_3^-$ ), por encima del cual el agua no sería adecuada para el consumo humano. A su vez, el nivel crítico para animales (caballos, vacunos, etc.) se ha establecido en 100 mg.  $\text{L}^{-1}$ .

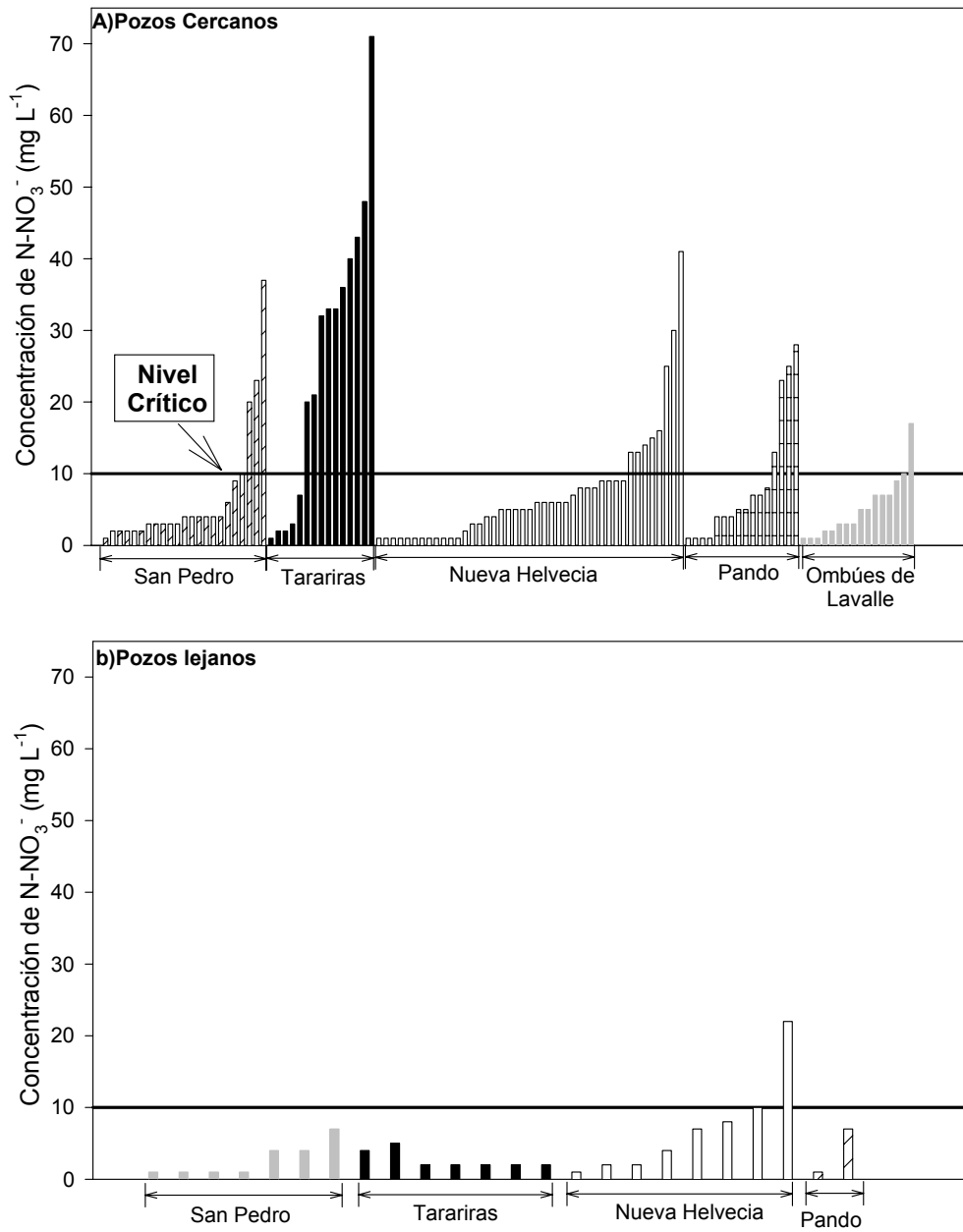
Estudios realizados por Perdomo et al., 1998, muestran que en el Uruguay las aguas superficiales tienen muy bajos niveles de  $\text{NO}_3^-$ . Esto es esperado, ya que debido a su solubilidad en agua y a que no es adsorbido por la matriz del suelo, el  $\text{NO}_3^-$  tiende a contaminar aguas profundas (Figura 23). Estos estudios han detectado elevados niveles de  $\text{NO}_3^-$  en aguas de pozos usadas para el consumo humano (Figura 24A). La fuente de contaminación parece ser local, asociada a pozos negros y a corrales, sitios donde se concentran niveles elevados de materia orgánica. Los pozos alejados de estas fuentes locales de contaminación no presentan niveles elevados de este anión (Figura 24B).



**Figura 23. Concentración de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en el agua de algunos ríos y arroyos del Uruguay. Perdomo et al., 1998.**

En los seres humanos también se han reportado casos de toxicidad por NO<sub>3</sub><sup>-</sup> por consumo de cultivos de hoja, tales como espinacas, lechugas, acelgas. Estos cultivos pueden acumular grandes cantidades de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (hasta 10000 mg · kg<sup>-1</sup> de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y el efecto tóxico de su consumo es también particularmente grave en los bebés.

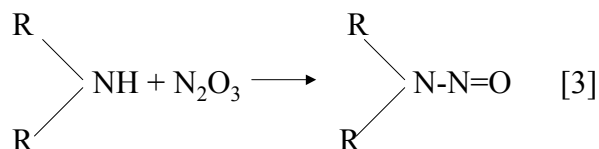
Existen también numerosos reportes de intoxicación por NO<sub>3</sub><sup>-</sup> de animales cuando consumen algunos cultivos como maíz, avena, sorgo. Estos cultivos también pueden acumular cantidades muy altas de este anión, especialmente luego de períodos de seca, que es cuando se favorecen las condiciones de acumulación de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en el suelo. Al reiniciarse el crecimiento, la velocidad de absorción de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> por las plantas es más rápida que la tasa de producción de materia seca, lo que produce que el NO<sub>3</sub><sup>-</sup> se acumule. En algunos años en nuestro país se han registrado numerosos casos de muerte de vacunos causada por intoxicación con NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, especialmente a principios de otoño luego de períodos secos.



**Figura 24. Concentración de  $\text{NO}_3^-$  en el agua subterránea de A) pozos lejanos y B) pozos cercanos a fuentes locales de contaminación en diversas zonas del país. Perdomo et al., 1998.**

## II. NITROSAMINAS

El nitrito también puede formar nitrosaminas, compuestos cancerígenos y mutagénicos, que además pueden disminuir la reserva hepática de tocoferol y carotenos. Las nitrosaminas se forman por la combinación de  $\text{NO}_2^-$  y aminas, de acuerdo a las reacciones [1] a [3].



El pH óptimo para la formación de estos compuestos es ácido (3.5 - 4), por lo que se especula que en el ser humano estas reacciones podrían ocurrir en el estómago; por ejemplo cuando se ingieren conjuntamente carne y sustancias con elevado contenido de  $\text{NO}_3^-$ . En algunos productos comestibles se han detectado niveles importantes de nitrosaminas; un ejemplo son los embutidos, que utilizan  $\text{NO}_3\text{K}$  como conservante.

## III. EMISION DE $\text{N}_2\text{O}$ Y PROBLEMAS AMBIENTALES

El  $\text{N}_2\text{O}$  se produce no solo durante la desnitrificación sino también durante la nitrificación. En el último caso, la emisión de  $\text{N}_2\text{O}$  representa solo una pequeña fracción del  $\text{NH}_4^+$  nitrificado. El ozono ( $\text{O}_3$ ) se forma en la estratósfera por la fotólisis del  $\text{O}_2$  causada por la radiación ultravioleta lejana. Este proceso, sin embargo, no ocurre en la baja atmósfera debido a que la misma capa de  $\text{O}_3$  que se forma en la estratósfera bloquea el pasaje de la radiación ultravioleta. La existencia de esta capa de ozono resulta esencial, ya que la radiación ultravioleta es nociva para los seres vivos, en parte porque produce cáncer a la piel.

Existen varias sustancias químicas capaces de destruir el  $\text{O}_3$  en la estratósfera, una de las más famosas son los clorofluorcarbonos o freón, gas usado en las heladeras y aerosoles. Otra sustancia capaz de destruir el  $\text{O}_3$  es el  $\text{NO}$  (óxido nítrico). Este proceso se representa en la siguiente ecuación:



Debido a que parte del  $\text{N}_2\text{O}$  (óxido nitroso) producido durante la desnitrificación se transforma en la estratósfera a  $\text{NO}$ , se especula que el aumento de la desnitrificación producido por un mayor uso de fertilizantes puede afectar la capa de ozono. El pasaje de  $\text{N}_2\text{O}$  a  $\text{NO}$  también se produce por la acción fotolítica de los rayos ultravioletas.



El átomo libre de oxígeno que aparece en la reacción [2] proviene de la fotólisis del  $\text{O}_3$  y del pasaje de  $\text{N}_2\text{O}$  a  $\text{N}_2$ , otro proceso fotolítico que sufre el  $\text{N}_2\text{O}$  en la estratósfera.

El gas  $\text{N}_2\text{O}$  es muy eficiente, además, en atrapar la radiación infrarroja que se escapa del planeta, por lo que un aumento de este gas en la atmósfera también puede contribuir al llamado "efecto invernadero". Actualmente, existe mucho interés a nivel mundial en cuantificar el impacto de la nitrificación y desnitrificación en el efecto invernadero.



## 7. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- Alexander, M. 1980. Introducción a la microbiología del suelo. AGT EDITOR, S.A. Pp 492.
- Barracough, D., P. Gibbs and A. Macdonald, A. 1998. A new soil nitrogen and carbon cycle. Publicado en el CD Rom del Congreso Internacional de Suelos. Francia. Binford, G., y Blackmer, A. 1993, Visually rating the nitrogen status of corn, *J. Production Agriculture*, 6:41-46
- Black, C. A. 1975. Relaciones suelo-planta, tomo II; Ed. Hemisferio Sur.
- Casanova, O. N. 1992. Principales procesos de pérdida de nitrógeno. Cátedra de Fertilidad de suelos y Fertilizantes. Facultad de Agronomía.
- Díaz-Rosello, R. M.; F. García y A. Bozzano. 1980. Dinámica de la disponibilidad de nitrógeno y las propiedades físicas del suelo en rotaciones de pasturas y cultivos. *Miscelánea 24, CIIAB. Estación Experimental La Estanzuela*. p. 1-25.
- Díaz-Rosello, R. 1992. Evolución del nitrógeno total en rotaciones con pasturas. *Revista. INIA Investigaciones Agronómicas*. N° 1, Tomo 1.p. 27-35.
- Durán, A. Los suelos del Uruguay. 1985. Editorial Hemisferio Sur. Pp 398.
- Firestone, M. K. 1982. Biological denitrification. p.289-326. In F. J. Stevenson (ed.). *Nitrogen in agricultural soils. Monography N° 22. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA.*
- Green y Blackmer, 1994. Tesis de Doctorado en la Universidad de Iowa, USA.
- Jansson, S. L., and J. Persson, 1982. Mineralization and immobilization of soil nitrogen. p 229-252. In F. J. Stevenson (ed.). *Nitrogen in agricultural soils. Monography N° 22. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA.*
- Hageman, R. H. 1984. Ammonium versus nitrate nutrition in higher plants. p. 67-86. R. D. Hauck (ed.). In *Nitrogen in crop production. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA.*
- Hauck, R. D. 1981. Nitrogen fertilizer effects in nitrogen cycle processes. p.551-562. In F.E. Clark and T. Roswall (ed.). *Terrestrial nitrogen cycles. Ecol. Bull. 33. Swedish Natural Science Research Council, Stockholm.*
- Ladd, J. N., and R. B. Jackson. 1982. Biochemistry of ammonification. P. 173-228. In F. J. Stevenson (ed.). *Nitrogen in agricultural soils. Monography N° 22. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA.*

- Legg, J. O., and J. J. Meisinger. 1982. Soil nitrogen budgets. p 503-566. In F. J. Stevenson (ed.). Nitrogen in agricultural soils. Monography N° 22. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA.
- Lewis, O. A. M.. 199? Plants and Nitrogen.. The Institute of Biology's Studies in Biology N° 166.
- Mallarino, A. P. , W. F. Wedin, R. S. Goyenola, C. H. Perdomo and C. P. West. 1990. Legume species and proportion effects on symbiotic dinitrogen fixation in legume-grass mixtures. Agron. J. Vol 82: 785 790.
- Nelson, D.W. 1982. Gaseous losses of nitrogen other than denitrification. p.327-363. In F. J. Stevenson (ed.). Nitrogen in agricultural soils. Monography N° 22. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA.
- Nelson, D.W. 1984. Effect of nitrogen excess on quality of food and fiber. p. 643-659. R. D. Hauck (ed.). In Nitrogen in crop production. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA.
- Perdomo, C. H.; O. N. Casanova y V. Ciganda. 1998. 4° Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. Relevamiento de Contaminación de aguas con NO<sub>3</sub>- en distintas zonas del Uruguay. ALHSUD, Montevideo – Uruguay, 16 al 20 de noviembre de 1998. Vol 2. Pp. 962.
- Perdomo, C. H. y R. Doderá, 1992. In. O. Casanova (ed) Principales procesos de pérdida de nitrógeno. Cátedra de Fertilidad de suelos y Fertilizantes. Facultad de Agronomía.
- Rice, C. W., y J. L. Havlin. 1974. Integrating mineralizable nitrogen indices into fertilizer nitrogen recommendation. In J. L. Havlin and J. S. Jacobsen (eds.). Soil testing: prospect for improving nutrient recommendations. Madison, WI, ASSA and SSSA. Pp. 1-13. (Agronomy Monography N° 40).
- Sharpley y Smith, 1995. Weather tillage and water quality in the Southern Plains. Soil & Tillage Research 30:33-48.
- Stevenson, F. J. 1982. Organic forms of soil nitrogen. P 67-122. In F. J. Stevenson (ed.). Nitrogen in agricultural soils. Monography N° 22. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA.
- Tisdale, S. L.; W. L. Nelson; J. D. Beaton y J. L. Havlin. 1993. Soil Fertility and Fertilizers. Quinta Edición.
- Uhart, S. y H. Echeverría. Fertilizar maíz. Revista Fertilizar INTA. Octubre de 1997.