

CAPITULO III

EL NITROGENO

El nitrógeno del suelo ocupa lugar prominente, entre los elementos esenciales para las plantas y por ello ha recibido más estudio y atención que cualquiera otro de los nutrimentos. El nitrógeno es posiblemente el elemento que ofrece las mejores perspectivas, para las alternativas de la fertilización, en muchos cultivos diferentes a los de la familia de las leguminosas. La fijación del nitrógeno por diferentes microorganismos está siendo ampliamente estudiada en Colombia y será de gran ayuda en esta vía alterna.

Este capítulo está orientado a buscar un buen entendimiento de la química y aprovechabilidad del nitrógeno del suelo. De otra parte, el conocimiento de los procesos por los cuales se pierde el nitrógeno del suelo, conducirá al de los métodos de empleo de mayor eficiencia en su uso.

3.1 ORIGEN DEL NITROGENO DEL SUELO.

El nitrógeno en el suelo es parte integral del ciclo general del nitrógeno en la naturaleza. La fuente primaria del nitrógeno del suelo es la atmósfera, donde el N_2 es el gas predominante pues ocupa el 79,08 por ciento del volumen de todos los gases presentes. La capa arable del suelo, de una pradera fértil de clima templado, puede contener hasta 7,5 toneladas de nitrógeno por hectárea. En la atmósfera que cubre esta misma área habrá cerca de 85.000 toneladas de nitrógeno elemental.

El nitrógeno atmosférico puede convertirse a formas utilizables por las plantas por cualquiera de los siguientes mecanismos :

- a. Fijación por microorganismos del género Rhizobium y otros mi-

microorganismos que viven simbióticamente en las raíces de algunas plantas, principalmente leguminosas.

- b. Fijación por microorganismos no simbióticos y
- c. Fijación como óxido nitroso (N_2O) a causa de descargas eléctricas en la atmósfera.

3.1.1 La Fijación Biológica del Nitrógeno.

Por fijación biológica del nitrógeno se entiende la asimilación del nitrógeno elemental (N_2) por microorganismos. Solamente un número muy limitado de microorganismos tienen la capacidad de utilizar el nitrógeno elemental. Todos los demás requieren para su metabolismo nitrógeno combinado. La fijación biológica del nitrógeno se efectúa por dos grupos de microorganismos: los que son capaces por sí solos de fijar el nitrógeno y aquellos que necesitan formar una simbiosis con plantas superiores para poder realizarla. La primera fijación se conoce como fijación no simbiótica del nitrógeno y la segunda como fijación simbiótica.

La fijación simbiótica del nitrógeno. La fijación simbiótica del nitrógeno ocurre principalmente entre plantas leguminosas y bacterias del género *Rhizobium*. Las especies del género *Rhizobium*, son numerosas y requieren de ciertas plantas huéspedes; por ejemplo, la bacteria que vive simbióticamente con la soya no lo haría con la alfalfa.

Los nombres específicos usados para describir la bacteria de cada uno de los seis principales grupos de "inoculación cruzada" son de dudosa validez taxonómica pero, se usan por conveniencia. Ellos son : *R. trifolli*; *R. meloti*; *R. lupino*; *R. leguminosarum*; *R. phaseoli* y *R. japonicum*.

Un hecho que generalmente se desconoce es que algunas plantas no leguminosas también fijan nitrógeno por un mecanismo similar al de la relación simbiótica entre leguminosas y bacterias del género *Rhizobium*

Ciertas especies de plantas, de las siguientes familias, forman nódulos y fijan nitrógeno: betuláceas, alagnáceas, miricáceas, coriariáceas, romnáceas y casuarináceas. Los principales géneros existentes en Colombia son : Coriaria, Myruca y Alnus (9).

La fijación no simbiótica del nitrógeno. De Rozo (1972) consideró la siguiente división de los organismos responsables de la fijación no simbiótica del nitrógeno.

- a. Heterotróficos aerobios. Los géneros más importantes pertenecen a la familia Azotobacteriáceae: Azotobacter: distribuido en todos los suelos no ácidos. Beijerinckia: su "habitat" principal lo constituyen los suelos tropicales. Derrxia: ha sido aislado en suelos del Brasil y de la India.

Algunos investigadores creen que el Beijerinckia vive no en los suelos sino en las hojas de muchas plantas tropicales. Otros agregan al Beijerinckia, al Azotobacter como un habitante de las hojas, además del suelo.

- b. Heterotrófico anaerobios. Entre los anaerobios facultativos y obligados, la fijación de N parece ser una característica más extendida que entre los aerobios. Se citan los siguientes géneros: Clostridium, Bacillus y Klebsiella. Este último forma nódulos en las hojas de plantas de los géneros Pavetta, Psychotria y Chomelia, los cuales pertenecen a la familia de la Rubiáceas.
- c. Autotróficos: El grupo más importante lo forman géneros de las algas Cyanophyceae, los cuales están bastante distribuidas, pero son particularmente abundantes en los trópicos húmedos. Entre los géneros que fijan N algunos de los más conocidos son: Amabaena, Calothrio, Fischerella y Nostoe. Algunas de estas algas forman asociaciones con hongos, para producir liquenes,

y también con plantas superiores, pero la fijación en estos casos depende solo del agua.

3.1.2 Factores que Afectan la Fijación Biológica del Nitrógeno.

Los factores que afectan la fijación biológica del nitrógeno son los siguientes :

- a. Luz. La luz es de importancia para los organismos fotosintéticos porque hace disponible la energía. En las algas azules la intensidad de la fijación depende de la intensidad de la luz (la que a su vez depende de la densidad del cultivo), del suministro de dióxido de carbono y de otros factores. En la simbiosis de las leguminosas, parece que la luz no solamente afecta la fotosíntesis, sino que también es necesaria en la nodulación, porque el proceso está controlado por el fitocroma, un sistema de pigmentos que es activado por la luz roja e inactivado por la luz infrarroja y por la oscuridad.
- b. Temperatura. La temperatura óptima para la fijación del nitrógeno varía ampliamente y está relacionada con la temperatura del "habitat" en el cual los microorganismos están viviendo. Las algas se caracterizan por su extremada tolerancia para fijar nitrógeno, en un amplio límite de temperaturas, lo cual explica su presencia desde los polos hasta las regiones tropicales.
- c. Condiciones del Suelo:

Reacción del suelo. El pH determina la distribución de los organismos fijadores de nitrógeno en el suelo. Aunque el *Asotobacter* crece en presencia de nitrógeno combinado a pH 5, su fijación se inhibe a pH menor de 6. El "habitat" del *Beijerinckia* lo constituye los suelos tropicales y por lo tanto su caracte-

rística principal es la tolerancia a las condiciones ácidas del suelo. Las algas azules raramente se encuentran en suelos con pH por debajo de 6. La inhibición de la fijación de nitrógeno en la simbiosis ocurre a un pH más alto que el necesario para inhibir el crecimiento de la planta en presencia de nitrógeno combinado.

Además del efecto directo sobre la asociación Leguminosa-Rhizobium, las condiciones ácidas del suelo producen problemas debido a las cantidades excesivas de elementos tales como Fe, Mn, y Al, y a la poca disponibilidad de nutrimentos como Ca, P y Mo. Esta falta de disponibilidad o la toxicidad de algunos elementos, afectan no solo a los microorganismos sino también a la planta, y conviene recordar que ambos deben contar con un medio propicio para que su asociación conduzca a una fijación eficiente del nitrógeno. En suelos pobres en nutrimentos, la fijación de nitrógeno será, por lo tanto escasa.

Humedad, Oxígeno, CO₂. En el suelo es necesario un grado de humedad que permita el crecimiento normal de las plantas y de los microorganismos. El contenido de humedad está inversamente relacionado con el oxígeno que a su vez, afecta el balance entre el Azotobacter y el Clostridio y la eficiencia de la fijación de nitrógeno por el Azotobacter. Las algas azules requieren para la óptima fijación de nitrógeno suficiente humedad y aún encharcamiento. El CO₂ es indispensable para los organismos autotróficos, puesto que es su fuente de carbono.

Materia orgánica. La fijación de nitrógeno en los organismos heterotróficos está ligada al proceso de crecimiento de las células, y se requiere la presencia de cantidades apreciables de materia orgánica, como fuente de energía. El principal factor limitante del crecimiento de las bacterias heterotróficas

en el suelo es por lo tanto la materia orgánica ya que el nivel de nutrimentos minerales raramente limita el desarrollo bacteriano.

Nitrógeno combinado. Cuando el Azotobacter y el Clostridio crecen en un medio que contiene nitrógeno mineral combinado, como sales de amonio, la nitrogenada no es forma y, por lo tanto no se lleva a cabo la fijación de nitrógeno. En las algas azules, de donde no se ha aislado todavía la nitrogenasa, el nitrógeno combinado también impide la fijación. En las plantas nodulares el efecto inhibitorio del nitrógeno combinado es característico y entre más alto sea el nivel de este nitrógeno menor será la fijación. Cantidades pequeñas de nitrógeno mineral pueden propiciar una mayor eficiencia en la fijación, debido al aumento de vigor en las plantas al iniciarse la nodulación.

d. Factores bióticos.

La Planta. Las diferentes especies vegetales que pueden fijar nitrógeno, varían en su capacidad de hacerlo. La literatura reporta a la alfalfa y a el trébol, entre las leguminosas que fijan mayores cantidades, y a la soya entre las fijan menos.

Esta habilidad de las leguminosas para fijar nitrógeno, hace que se las emplee en rotaciones y como abonos verdes. Sin embargo, ambas prácticas son mucho menos usadas actualmente que en épocas anteriores, debido entre otros factores a la efectividad de los insecticidas, fungicidas y nematocidas, y a factores económicos y de administración. Es mucho más fácil administrar una finca en monocultivo y mucho más económico usar fertilizantes nitrogenados que enterrar un abono verde.

Rizosfera. De acuerdo con Jensen (1965), el efecto benéfico de la rizosfera sobre el *Asotobacter* es muy pequeño y aún su efecto puede ser perjudicial, debido a que el pH de la rizosfera es más bajo que el del suelo. El efecto de la rizosfera en el *Clostridio* no ha sido dilucidado todavía. Las secreciones radiculares de las leguminosas estimulan la multiplicación de los rizobios presentes en la rizosfera, y en general, existe un efecto estimulante selectivo de la planta hospedante hacia sus propias cepas de rhizobium.

Eficiencia de la cepa rhizobiana. Para que la asociación *rhizobium*-leguminosa, sea efectiva, es decir, que se fije nitrógeno, el endófito debe producir un nódulo efectivo. En los suelos, generalmente en el mejor de los casos los *rhizobios* naturales son una mezcla de cepas efectivas o inefectivas, lo que disminuye la eficiencia de la fijación en la planta hospedante. Por lo tanto, la mejor política, en la mayoría de los casos consiste en suministrarle a la planta el microorganismo por medio de la inoculación.

3.1.3 Valores de la Fijación del Nitrógeno.

Los valores de la fijación del nitrógeno por los diferentes microorganismos varían, pero algunos autores han calculado valores tan altos como 100 millones de toneladas anuales en todo el mundo. Se calcula que la fijación asimbiótica, aporta anualmente al suelo entre 10 y 20 kilogramos de N por hectárea. Los valores calculados u obtenidos para la fijación simbiótica, son mayores y algunas leguminosas inoculadas efectivamente, fijan 200 ó más kilogramos de N por hectárea y por año. Rojas y Lotero (1970), en trabajos efectuados en Colombia con 13 leguminosas, encontraron que, en un lapso de 105 días después de la germinación, el nitrógeno fijado varió entre 70 y 100 kilogramos de N por hectárea. Estas cantidades fueron fijadas respectivamente por el frijol terciopelo (*Stimolobium deeringianum*) y el *Centrosema* (*Centrosema pubescens*).

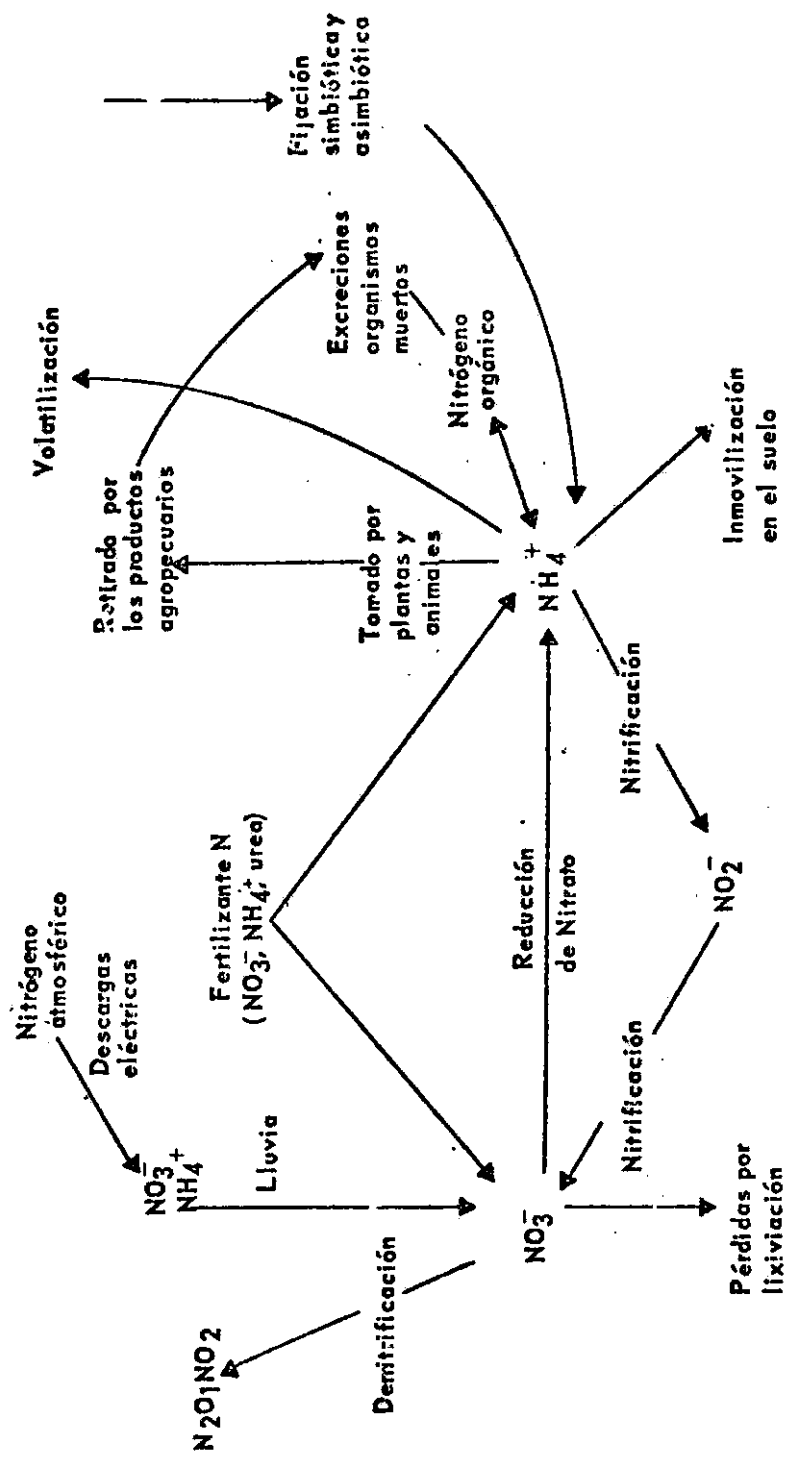


Figura 6. El Ciclo del Nitrógeno (16).

Gómez (1968), de un estudio de rotaciones concluyó, que en el Valle del Río Cauca no son necesarias las aplicaciones de fertilizantes nitrogenados en el cultivo de maíz cuando este sigue a un cultivo de soya o alfalfa. La producción es similar a la de maíz en monocultivo fertilizado con nitrógeno. El rendimiento de la segunda cosecha de maíz después de soya, fue similar al del maíz en monocultivo sin fertilización con nitrógeno (Fig. 7). El efecto benéfico de la alfalfa se extendió a las dos cosechas de maíz que le siguieron. No se conoce la causa por la cual, el efecto benéfico de la alfalfa se extiende a dos cosechas de maíz, mientras que con la soya se refleja solamente en la siguiente. Gómez (1964) atribuyó esta diferencia, a que siempre se incorporó parte aérea de la alfalfa cuando se aró para la siembra del maíz y a que la cantidad del nitrógeno que fija la alfalfa es superior a la fijada por la soya, a que el sistema radicular de la alfalfa es mucho más abundante y resistente y a que el tiempo en que el suelo está con alfalfa es mayor al que está con soya y además que unos cultivos requieren más laboreo que otros.

3.2 LA MINERALIZACION Y NITRIFICACION DEL NITROGENO DEL SUELO.

En la naturaleza, solamente una pequeña parte del nitrógeno del suelo está involucrado en el ciclo biológico activo, o sea el proceso mediante el cual el nitrógeno va de los tejidos de plantas y animales, por descomposición lenta, a formas minerales y luego regresa a su forma orgánica a través de la absorción por las plantas y los microorganismos. La definición de mineralización del nitrógeno es simplemente la conversión del nitrógeno orgánico al mineral ($\text{NH}_4 + \text{NO}_2^-$, NO_3^-).

La mineralización de los compuestos orgánicos de nitrógeno tiene lugar en tres etapas: aminización, amonificación y nitrificación. Las primeras etapas se efectúan por medio de microorganismos heterotróficos y la tercera etapa principalmente por bacterias autótrofas. Los organismos heterótrofos requieren compuestos orgánicos de carbono como su fuente de energía. Los organismos autótrofos obtienen su energía de la

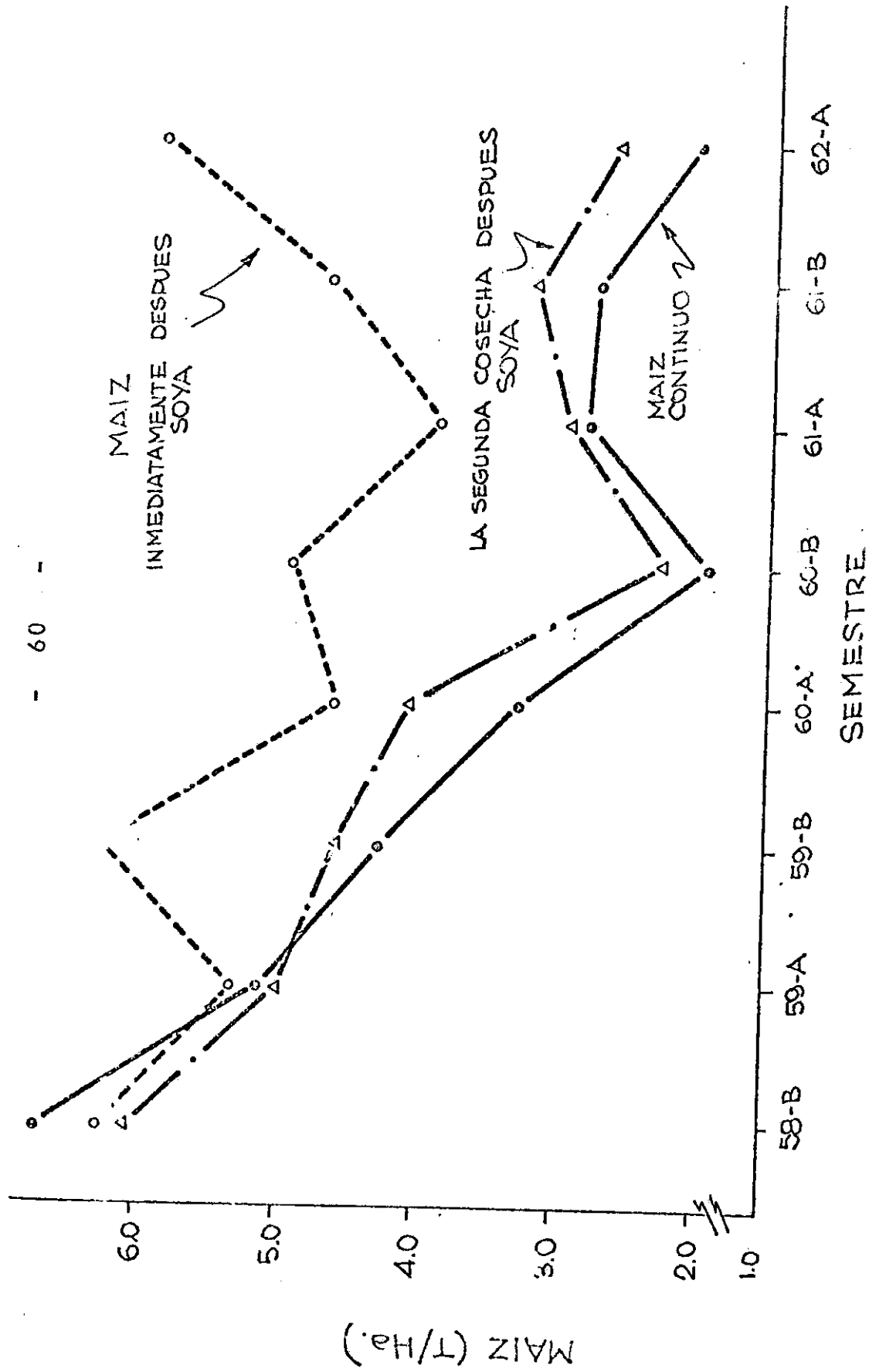


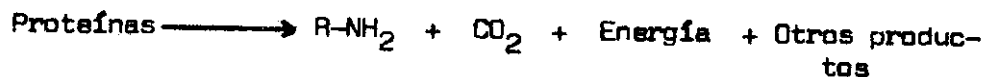
Figura 7. Rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) cultivado continuamente y en rotación con soya (*Glycine hispida* Maximowicz) en el valle geográfico del río Cauca (13).

oxidación de sales inorgánicas y su carbón del dióxido de carbono de la atmósfera que los rodea.

3.2.1 Mecanismos y Etapas de la Mineralización y Nitrificación.

- a. Aminización. La población de microorganismos heterotróficos del suelo está compuesta de numerosos grupos de bacterias y hongos, cada uno de los cuales es responsable de una o más etapas en la descomposición de la materia orgánica del suelo. Los productos finales de las actividades de un grupo proporcionan el sustrato para la etapa siguiente y así se continúa hasta que el material se descompone totalmente.

Una de las etapas finales de la descomposición de los materiales nitrogenados, es la descomposición hidrolítica de las proteínas y la liberación de aminas y aminoácidos. Esta etapa se denomina aminización y es función de algunos de los organismos heterotróficos. Se presenta esquemáticamente en la forma siguiente :



- b. Amonificación. Las aminas y los aminoácidos son utilizados posteriormente por otros grupos de organismos heterotróficos produciéndose la liberación de compuestos amoniacales. Esta etapa se denomina amonificación y se representa esquemáticamente en la forma siguiente :

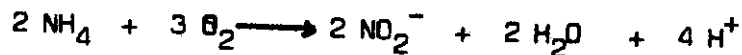


El amoníaco liberado puede ser convertido a nitritos y a nitratos o absorbido directamente por las plantas, o utilizado por organismos heterotróficos en posterior descomposición de residuos orgánicos o puede ser fijado en la estructura cristalina

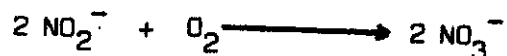
de ciertos minerales de arcilla expandibles.

- c. Nitrificación. Algo del NH_4^+ liberado en el proceso de amonificación es convertido a NO_3^- . Esta oxidación biológica del amonio a nitrato se conoce como nitrificación. Es un proceso que tiene lugar en dos etapas en el cual el amoniaco es convertido primero a nitrito (NO_2^-) y luego a nitrato (NO_3^-).

La conversión del amonio (NH_4^+) a nitratos (NO_3^-) se efectúa principalmente por bacterias autotróficas como las nitrosomas, mediante una reacción que se puede representar en la forma siguiente :



La conversión de nitrito se efectúa principalmente por un segundo grupo de bacterias autotróficas obligadas, denominadas nitrobacterias. La ecuación que representa esta reacción puede escribirse como sigue ;



Tres observaciones importantes resultan en las ecuaciones de la nitrificación. En primer lugar la reacción requiere oxígeno molecular. Esto significa que el proceso tiene lugar en suelos bien aireados. Una segunda observación es que la reacción libera iones hidrógeno (H^+), lo cual resulta en acidificación del suelo. Este fenómeno también ocurrirá entonces cuando los fertilizantes nitrogenados amoniacales y orgánicos se aplican al suelo. El uso continuado de tales fertilizantes resultará en una disminución del pH del suelo. Una tercera observación importante se relaciona con la actividad microbiana. Esta actividad está condicionada en alto grado, por las condiciones ambientales del suelo tales como, la humedad y la temperatura. Estos factores se discutirán más ampliamente en la sección siguiente.

Se debe insistir en poco sobre la acidificación del suelo por algunos fertilizantes nitrogenados. A causa de este efecto se puede afectar la aprovechabilidad de otros nutrimentos y la actividad de los microorganismos del suelo. Algunos fertilizantes tienen mayor poder acidificante como se puede apreciar en la Tabla 4.

TABLA 4. Índice de acidez de algunos fertilizantes nitrogenados.

Fuente de nitrógeno	Índice de Acidez
Nitrato de Amonio	60
Sulfato de amonio	110
Urea	80

Michielin et al (1968) encontraron, en un suelo del Valle del Cauca, con capacidad de intercambio catiónico de 21 meq por 100 g de suelo, que el pH disminuyó de 6,2 a 5,3 cuando la cantidad total de N aplicado en forma de urea llegó a 6 toneladas. A su vez, Lotero y Monsalve (1970) encontraron en un suelo aluvial del Valle de Medellín con capacidad de intercambio catiónico de 8,4 meq por 100 g de suelo, que con 5 toneladas de N aplicado en forma de sulfato de amonio, el pH disminuyó de 5,4 a 3,9. En general, los abonos nitrogenados que no aportan al suelo algún catión metálico como Ca^{++} , Mg^{++} , K^{+} o Na^{+} , lo acidifican.

3.2.2 Factores que Afectan la Nitrificación.

Como una regla general, los factores ambientales que favorecen el desarrollo de las plantas son aquellas que también favorecen la actividad de las bacterias nitrificantes. Los factores que afectan los procesos de nitrificación en los suelos son : a) el suministro del ion amonio, b) la población de organismos nitrificantes, c) la reacción del suelo, d) la aireación del suelo, e) la humedad y f) la temperatura. Se discutirá brevemente cada uno de ellos.

- a. Suministro del ión NH_4^+ . Si las condiciones no favorecen la liberación del amonio de la materia orgánica, o si no se agregan fertilizantes que contengan amonio, no habrá nitrificación. Si la relación de carbono a nitrógeno (C:N) en el suelo es demasiado amplia, mayor de 30, cualquier amonio que se libera de la materia orgánica será aprovechado por la población heterotrófica que está descomponiendo el material orgánico. Solamente cuando la relación C:N está por debajo de 20 habrá una liberación neta del nitrógeno mineral.

Cuando se incorporan al suelo residuos de cosechas con limitadas cantidades de nitrógeno (tamo de cereales, tallos de maíz o materiales similares), este nitrógeno será usado por los microorganismos en la descomposición de los residuos carbonáceos. Si se siembran los cultivos inmediatamente después de incorporar esos residuos, pueden presentarse deficiencias de nitrógeno en las plantas. Estas deficiencias pueden prevenirse con la adición de nitrógeno, al tiempo de rastrillar o de la siembra, para suplir las necesidades de los microorganismos así como también las del cultivo, o evitando sembrar inmediatamente después de la incorporación. Tales deficiencias de nitrógeno, inducidas por la materia orgánica aplicada, no son comunes sino ejemplos localizados que han sido observados en el campo. En resumen, la incorporación al suelo de materia orgánica de relación C/N mayor de 30, suspende temporalmente el proceso de nitrificación.

- b. Población de microorganismos. Aunque varios organismos pueden llevar a cabo la formación de nitrato o nitrito en un medio de cultivo, solamente dos grupos: Nitrosoma y Nitrobacter actúan consistentemente en los cultivos enriquecidos con amonio. Por consiguiente, estos son los principales organismos nitrificantes. El número de nitrosomas y nitrobacterias varía considerablemente en los suelos. En suelos sin fertilizar o

suelos ácidos, el número es generalmente bajo, a menudo menos de 100 células por gramo de suelo. La fertilización nitrogenada induce a una proliferación rápida en ambos grupos de microorganismos.

- c. La reacción del suelo. La tasa de nitrificación está estrecha y directamente correlacionada con el pH del suelo. La reacción óptima en el suelo para la mayoría de los organismos que intervienen en la oxidación del amoníaco está por encima de la neutralidad, mientras que los oxidadores de nitritos está muy cerca del punto neutro. Evidencias recientes indican que el aparente pH óptimo para las bacterias en el suelo difieren un poco de los valores anotados cuando los organismos autotróficos se desarrollan en soluciones nutritivas.

En la Tabla 5 se presentan algunos datos sobre la capacidad de varios suelos colombianos para producir nitratos. Algunos estudios preliminares realizados en el Valle del Cauca (15) indicaron que el promedio de la tasa de mineralización en laboratorio está alrededor de 1.78 por ciento, pero los límites encontrados fueron amplios : 0.08 a 2.24 por ciento.

TABLA 5. Capacidad de varias suelos colombianos para producir nitratos y algunas de sus propiedades más importantes (León, A. 1960).

Suelo	NO ₃ ppm	M.O. %	pH	P (ppm) Bray II	Al meq/100 g
Turipaná (Córdoba)	78	2.9	6.7	82.4	0.1
Serie Tibaitatá (Cund.)	72	6.6	5.0	29.1	0.4
Codazzi	45	2.4	7.3	24.7	0.1
Serie Arroyo	43	1.4	6.5	24.7	0.1
El Placer - Pop.	37	13.2	4.6	19.1	2.6
La Selva - Ant.	18	27.6	5.0	3.7	2.1
Serie Río Bogotá	4	3.6	4.4	16.6	3.2
La Libertad	3	3.1	4.5	5.5	3.3

De acuerdo con los datos de la tabla 5, los suelos de Turipaná y de la serie Tibaitatá fueron los que mostraron mayor capacidad para producir nitratos siguiéndoles los de Codazzi, la serie arroyo y El Placer. El suelo de la Selva tuvo una capacidad menor. En los suelos de las series Rio Bogotá y La Libertad prácticamente no hubo producción de nitratos, Nótese la relación existente entre la producción de nitratos con el pH del suelo y el contenido de aluminio intercambiable. Sin embargo, otros investigadores como Blasco (1972) trabajando con suelos derivados de cenizas volcánicas del altiplano del Nariño encontró que el nitrógeno mineralizado fue mayor cuando se añadió sulfato de aluminio al suelo.

Por otra parte, las bacterias nitrificantes necesitan un adecuado suministro de calcio y fósforo y un balance apropiado de los elementos hierro, cobre, manganeso y otros, La influencia tanto del pH como del calcio aprovechable sobre la actividad de los organismos nitrificantes sugiere la importancia de encálar los suelos ácidos.

- d. Aireación del suelo. Las nitrobacterias, como se ha indicado previamente, son organismos autotróficos aerobios obligados. Estos organismos no producirán nitratos en ausencia de oxígeno molecular.

La relación entre el nivel de oxígeno y la nitrificación ha sido estudiada por numerosos investigadores. La nitrificación máxima ocurre cuando el porcentaje de oxígeno es aproximadamente de 20, lo cual es casi la misma concentración de este gas en la atmósfera que rodea la superficie de la tierra. De ahí la importancia de mantener condiciones que permitan la difusión rápida de los gases dentro y fuera del suelo, Los suelos que poseen buena estructura, facilitan el intercambio rápido de gases, y aseguran un suministro adecuado de oxígeno para las nitrobacterias.

- e. La humedad del suelo. Las nitrobacterias son más sensibles a excesos de humedad que a condiciones del suelo seco. Como norma general la mayor actividad nitrificante ocurre cuando el contenido de humedad del suelo es de alrededor del 50 al 67 por ciento de la capacidad de campo. Los nitratos no se producen cuando el suelo está seco o el contenido de humedad es muy bajo. Los nitratos se producen rápidamente en los períodos húmedos que siguen a una sequía prolongada.

En trabajos de campo realizados en suelos del Valle del Cauca se apreció buena producción de nitratos en los períodos lluviosos. La figura 8 muestra los resultados de la producción de nitratos en una finca de Bolo Alizal (Palmira) en un experimento de fertilización del maíz, en el cual se estudiaron cuatro niveles de nitrógeno para medir la influencia en el rendimiento de dicho cultivo. Los máximos contenidos de nitratos en el suelo, coinciden con el período de máxima precipitación, que generalmente ocurre en el mes de Mayo para la región del Valle del Cauca.

- f. La Temperatura. Los efectos de la temperatura sobre la nitrificación del nitrógeno orgánico han sido estudiados por numerosos investigadores en condiciones de campo, invernadero y laboratorio. La temperatura óptima tanto en el suelo como en el medio de cultivo, está entre 30 y 35°C. Raramente hay producciones significantes por encima de 40°C. La temperatura mínima está relacionada con el tiempo, ya que a baja temperatura en períodos largos se alcanzan producciones relativamente altas de nitratos.

3.2.3 Importancia Práctica de la Nitrificación.

El proceso de la nitrificación tan alabado durante muchos años ha caído en desgracia. Mientras que anteriormente se recalcaba sobre la

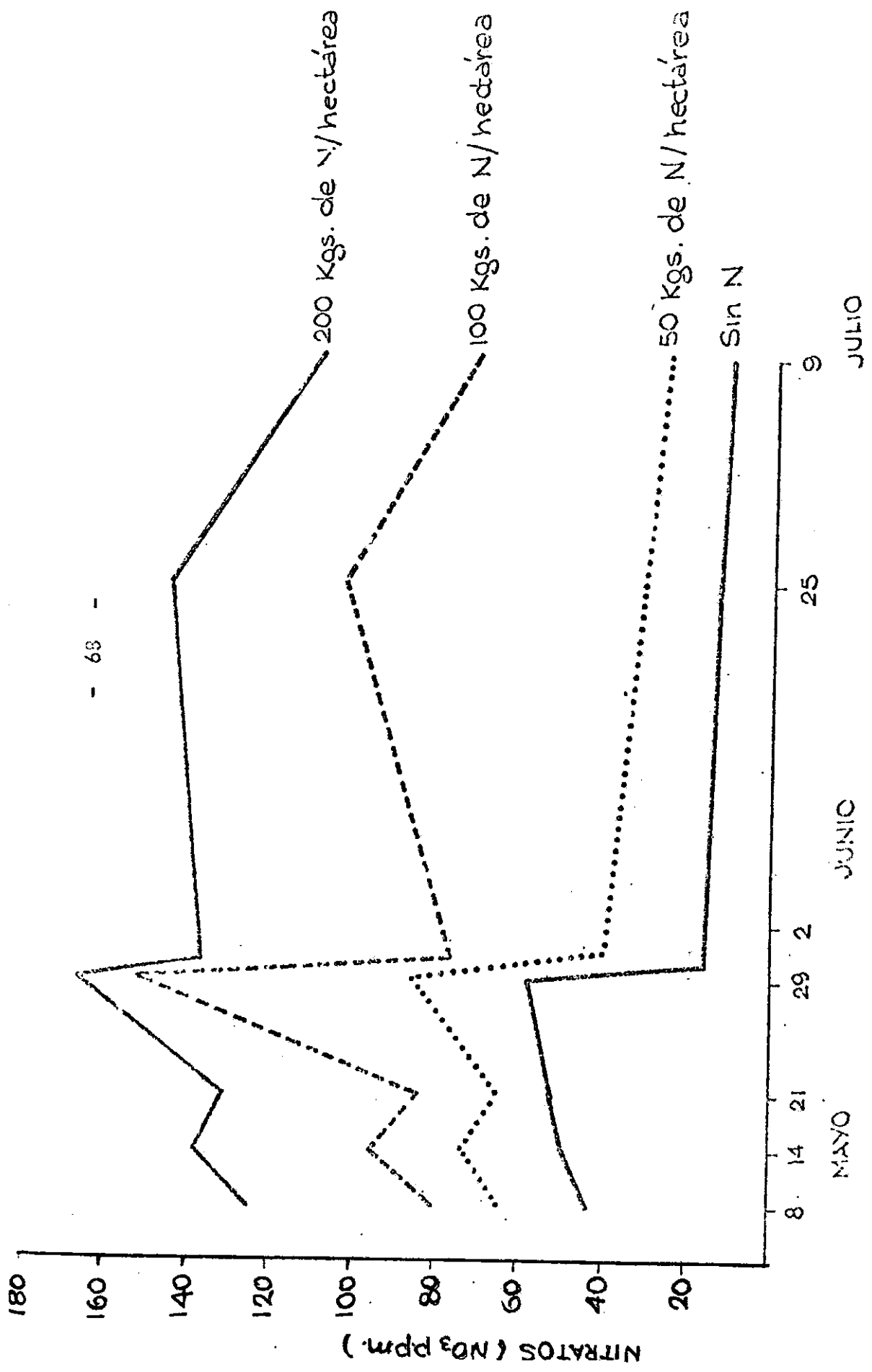


Figura 8. Producción de nitratos en un suelo del Valle del Cauca cultivado con maíz (14).

mayor disponibilidad de los nitratos para las plantas, ahora se hace énfasis en lo adecuado que es el amonio, en la acidificación que ocurre en el suelo con la nitrificación, en las pérdidas de nitrato a través de la lixiviación y la denitrificación y en la toxicidad, que producen los nitratos. Más interés se ha puesto sobre el movimiento de los nitratos en el suelo que sobre el movimiento de cualquiera otra forma de nitrógeno. un aspecto importante es la pérdida de los nitratos del perfil del suelo debido a la lixiviación.

En la zona cafetera colombiana, o sea entre un gradiente de 18 a 22°C, existe buena nitrificación pues la temperatura, la humedad y las buenas condiciones físicas del suelo la propician (21). Sin embargo, hay que considerar que se presenta una fuerte lixiviación de nitratos en los períodos de lluvias con aguaceros de intensidades altas. Experimentos realizados en Cenicafé (López, 1969), han valorado pérdidas por percolación de nitrógeno nítrico de 320 kg/Ha/año, en la serie Chinchiná, índice además de la buena nitrificación ocurrida.

Conviene recordar que, entre los fertilizantes, los nitratos son posiblemente los únicos que preocupan por la contaminación que están causando en las aguas superficiales y subterráneas de los países como un alto consumo de fertilizantes nitrogenados. Los nitratos forman parte de todas las masas acuosas y los seres vivos los toleran y los requieren, siempre que su concentración no sobrepase determinados límites. Ocho o nueve partes por millón de nitratos en el agua potable causan graves dificultades respiratorias en los lactantes. Los alimentos con un alto contenido de nitratos presentan también el mismo problema y se han dado casos de animales envenados por este motivo, sobre todo de ganado vacuno.

3.2.4 La Mineralización del Nitrógeno en Suelos Tropicales.

Varios factores peculiares de los trópicos influyen en el curso de la mineralización del nitrógeno orgánico del suelo. Quizás el factor principal es la temperatura. La ausencia de una estación fría permite

que la mineralización prosiga durante todo el año si la humedad no es un factor limitante. Por lo tanto, las tasas anuales de mineralización podría ser mayores que en las zonas templadas.

La estación seca que ocurre en la mayoría de las áreas tropicales tiende a causar una excitación de la actividad microbiana y de la mineralización del nitrógeno. Este rumbi de la mineralización y por consiguiente del nitrógeno aprovechable en el comienzo de la estación húmeda, es un factor muy importante en el uso del nitrógeno en muchas partes de los trópicos, pero si las precipitaciones son altas las pérdidas por lixiviación del nitrógeno aprovechable son altas (5).

Los suelos de cenizas volcánicas tienden a ser altos en nitrógeno orgánico, pero también tienden a suministrar nitrógeno lentamente, ya que la materia orgánica es relativamente estable ante la mineralización.

Según Blasco (1972), en los suelos tropicales, abundantes en sesquióxidos y en los derivados de cenizas volcánicas, el proceso de amonificación es más relevante que el proceso de nitrificación. Se ha comprobado que la actividad microbiana, medida en términos de CO_2 , correlaciona significativamente con la producción de N-NH_3 , mientras que la correlación no existe con la formación de N-NO_3 , lo cual significa que el metabolismo heterotrófico es el dominante.

3.3 LA DISTRIBUCION DEL NITROGENO DEL SUELO.

3.3.1 La Distribución del Nitrógeno en Suelos Colombianos.

La distribución del nitrógeno en los suelos colombianos corrobora algunos de los puntos relacionados con los factores de formación del suelo. El contenido total de nitrógeno de los suelos aumenta con la disminución de la temperatura tal como se observa en la Tabla 6, o de la altitud en el caso colombiano. De allí que hay respuestas de los cultivos a las aplicaciones de nitrógeno sean menos frecuentes en los climas fríos del país y acentuados en la regiones de clima cálido.

TABLA 6. Contenido de nitrógeno en la capa arable de algunas regiones de Colombia y su relación con la temperatura (Marín, G. y J.A. Gómez, 1966).

Región	Temperatura media anual °C	Porcentaje de N
Páramo (Cundinamarca)	10	1.18
La Selva (Antioquia)	15	1.00
El Placer (Cauca)	19	0.56
Valle del Cauca	24	0.21
Espinal (Tolima)	28	0.12

El sistema suelo-nitrógeno es un sistema dinámico y cualquier alteración en el medio ambiente, tal como un cambio en el clima puede producir un cambio en el nivel de equilibrio del nitrógeno en el suelo. El clima es el factor más importante que determina la clase de vegetación en una región, la cantidad de material de planta producida, y la intensidad de la actividad microbiana en el suelo. En consecuencia el factor clima, juega un papel muy importante en la acumulación de materia orgánica y de nitrógeno. En la Tabla 7 se presenta la distribución de distintas formas de nitrógeno en la capa arable de algunas regiones de Colombia. La fracción predominante es la forma orgánica, siguiendo el NH_4^+ nativo.

Al igual de lo que sucede con la materia orgánica, el contenido de N total del suelo disminuye a medida que se profundiza en el perfil del suelo. Para los suelos del Valle del Cauca, hay una clara tendencia en este sentido, como se observa en la figura 9.

3.3.2 Factores que Afectan el Contenido de Nitrógeno en Una misma Zona.

Dentro de una misma zona el contenido de N total del suelo puede estar afectado por uno o más de los siguientes factores :

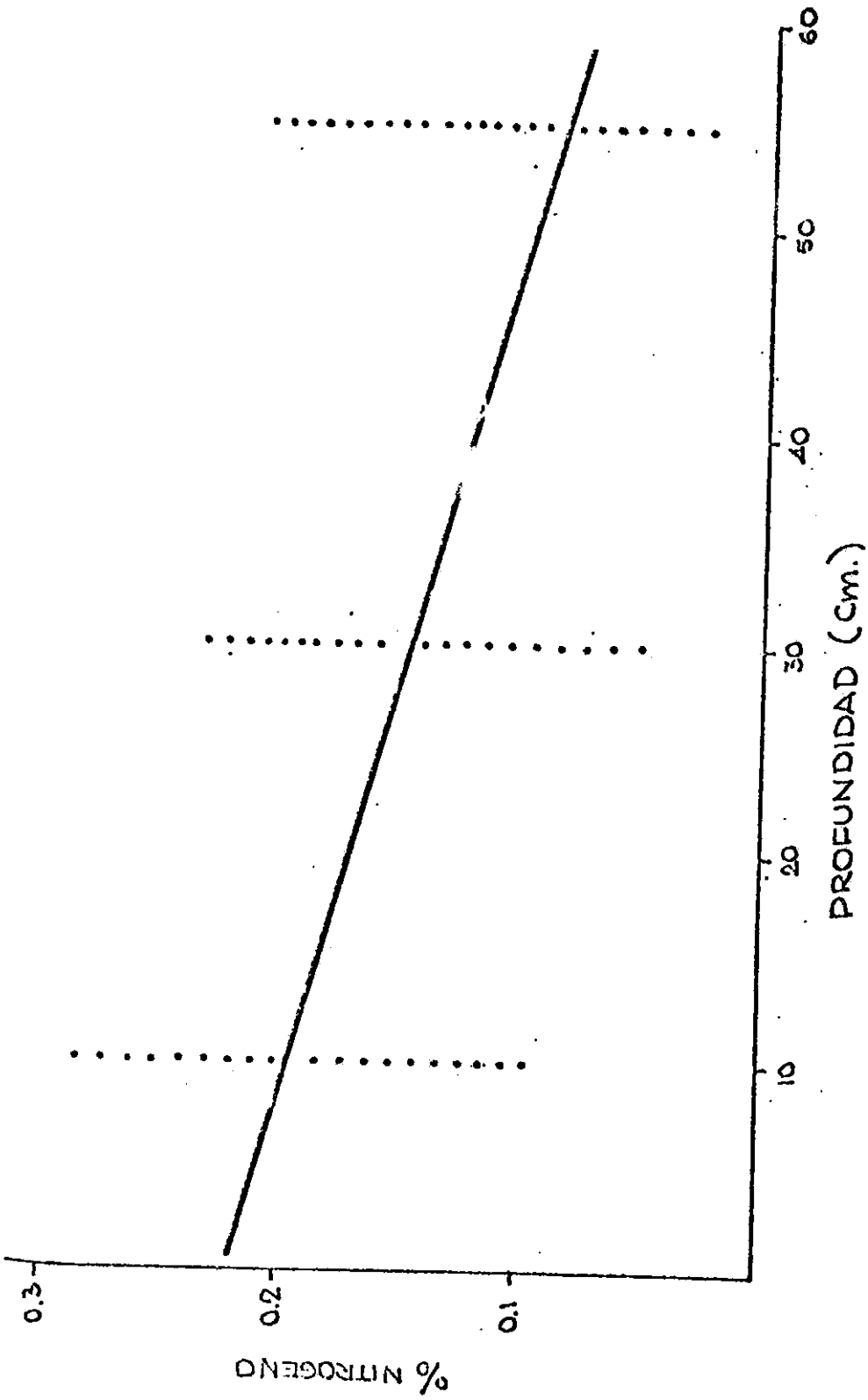


Figura 9. Porcentaje de N total a diferentes profundidades del suelo en 64 localidades del valle del río Cauca (14).

TABLA 7. Concentraciones promedias de distintas fracciones de N en la capa arable en algunas regiones de Colombia (Blasco, M. 1972).

Formas de N	Valledupar		Valle del Cauca (parte plana)		Nariño (Altiplano de Pasto).	
	ppm	%	ppm	%	ppm	%
N- Total	1.319	(100)	2.668	(100)	4.710	(100)
N-Orgánico	1.012	(76.8)	2.415	(90.5)	4.545	(96.5)
N.inorgánico	307	(23.2)	563	(9.5)	164	(3.5)
N-NH ₄ ⁺ nativo fijo	288	(17.2)	183	(7.5)	89	(1.9)
N.intercambiable	79	(6.0)	66	(2.5)	75	(1.6)
N-NH ₃	79	(6.0)	8	(0.3)	9	(0.2)
N- NO ₃	-		14	(0.5)	45	(0.1)

- a. La vegetación. Los suelos que han sido cultivados con plantas de sistema radical extenso, tienen generalmente mayor cantidad de nitrógeno y de materia orgánica, que aquellos cultivados con plantas de sistema radical restringido. Así los suelos en pradera, comparados con los suelos dedicados a maíz, tienen mayor cantidad de nitrógeno. La importancia práctica de este hecho radica en que no es necesario, generalmente, la aplicación de fertilizantes nitrogenados en los cultivos sembrados inmediatamente después de que el terreno haya sido ocupado por pastos. En general los suelos son cultivos que requieren frecuentes preparaciones del suelo como los semestrales o anuales, maíz y soya por ejemplo, tienen menor contenido de N total que aquellos con cultivos que exigen poco laboreo del suelo, como sucede con pastos, alfalfa y los llamados cultivos perennes.

La clase de material vegetal también influye en el contenido

de nitrógeno del suelo. En la Tabla 8 se presentan datos que muestran que las raíces del trébol contienen más nitrógeno que las de maíz y avena. A su vez las de maíz contienen más nitrógeno que las de avena.

TABLA 8. Contenido de nitrógeno de las raíces de varias plantas. (Russel, E.W. 1963).

Planta	Contenido de N en las raíces (%)
Avena	0.45
Maíz	0.79
Trébol	1.71

Estas cifras como es obvio, indican que se encuentra más nitrógeno en el suelo, después de un cultivo de leguminosas que después de un cultivo de plantas o leguminosas. El influjo de este tipo de material no es tanto sobre el contenido de nitrógeno total del suelo, sino sobre el contenido de nitrógeno asimilable. Este hecho tiene mucha importancia en la rotación de cultivos y en el uso de fertilizantes nitrogenados.

- b. La topografía. La topografía o relieve, afecta el contenido de nitrógeno en el suelo a través de su influencia sobre la escorrentía y la erosión del suelo.

En suelos de topografía plana, naturalmente húmedos y pobremente drenados, generalmente poseen altos contenidos de nitrógeno, porque prevalecen condiciones anaeróbicas durante los períodos húmedos del año, los cuales previenen la destrucción escalonada de la materia orgánica. El drenaje de estas áreas

conduce frecuentemente a mermas pronunciadas del contenido de N total y del asimilable. También contribuyen a estas diferencias los procesos erosivos que se observen frecuentemente en las zonas pendientes.

- c. La textura del suelo. Es bien conocido, que, para una zona climática dada, donde el clima y la vegetación son iguales, el contenido de nitrógeno del suelo depende de su textura. En general, a mayor contenido de arcilla, corresponde un mayor contenido de nitrógeno. El fijación de substancias húmedas, en la forma de complejos orgánico-minerales, sirve para preservar el nitrógeno en el suelo. La materia orgánica de estos complejos es resistente a la oxidación por microorganismos y a la remoción por extractos químicos, lo cual sugiere que ello es posible debido a su asociación con el material mineral del suelo.

La retención de compuestos de nitrógeno en el suelo, es también afectado por el tipo de arcilla. Las arcillas mormorillonitas, que tienen altas capacidades de adsorción de moléculas orgánicas, protegen los constituyentes nitrogenados del ataque de microorganismos. El hecho de que los suelos arcillosos tengan un mayor contenido de nutrimentos y en muchos casos una mayor capacidad de retención de humedad, que los de textura más gruesa, explica también su mayor contenido de nitrógeno, por favorecerse la elaboración de materias orgánicas.

- d. Sistema de cultivo. Los sistemas agrícolas, que extraen intensivamente las reservas de nitrógeno del suelo para suplir los requerimientos de las plantas, no pueden producir rendimientos altos durante muchos años. En algunos suelos, como los del Valle geográfico del Río Cauca, se encuentran suficientes cantidades de nitrógeno para varios años de cultivo, sin adiciones externas, pero cuando la tierra se cultiva con-

tinuamente el contenido de nitrógeno asimilable del suelo declina rápidamente y es menester aplicar fertilizantes nitrogenados para obtener cosechas abundantes y evitar la merma de la producción.

La pérdida de nitrógeno es más rápida durante los primeros años de cultivo, después de la tasa de disminución del nitrógeno en el suelo va bajando lentamente hasta alcanzar finalmente un nivel de equilibrio, que es característico del clima, del tipo de suelo y de las prácticas culturales efectuadas. En el punto de equilibrio, esencialmente todo el nitrógeno requerido para el crecimiento de las plantas debe provenir de fuentes externas, como por ejemplo, a través de la fijación biológica del nitrógeno o de la aplicación de fertilizantes nitrogenados. El cultivo continuo hace que el contenido del nitrógeno del suelo decline, debido a que acelera los procesos químicos y biológicos que mineralizan la materia orgánica.

3.4 LAS PERDIDAS DE NITROGENO DEL SUELO.

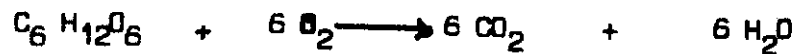
En Colombia son comunes las pérdidas de suelo por erosión. Como esta afecta principalmente la capa superficial, se deduce que por este motivo hay serenas pérdidas de nitrógeno en aquellas regiones sujetas a la acción de los procesos erosivos. Las investigaciones de la Federación Nacional de Cafeteros, indican que en Colombia se pierden anualmente, por arrastre al mar, 426 millones de toneladas de tierra. Esta pérdida se experimenta en un área de 4,5 millones de hectáreas explotadas con cultivos de tipo anual, de tipo perenne y praderas naturales o artificiales. Como evitar pérdidas es parte de un curso de conservación y manejo de suelos.

Además de las pérdidas de los nitratos por lixiviación, a que se aludió en párrafos anteriores, existen otros mecanismos por los cuales

se pierde el nitrógeno del suelo. En estas pérdidas el nitrógeno en la forma de gas, pasa a la atmósfera. Estos mecanismos son: la denitrificación, la descomposición química del ácido nitroso (HNO_2) y la volatilización del amoníaco.

3.4.1 La Denitrificación.

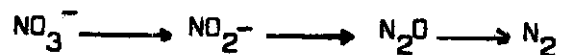
La denitrificación se refiere a la reducción biológica de los nitratos a gases volátiles, generalmente óxido nitroso (N_2O) y nitrógeno molecular (N_2), promovido por bacterias anaerobias facultativas. Bajo condiciones aeróbicas, la oxidación de un carbohidrato simple, tal como la glucosa, conlleva a la formación de CO_2 y agua así :



En ausencia de oxígeno, pero en presencia de nitrato, esas bacterias son capaces de respirar nitrato, reacción que puede expresarse como sigue :

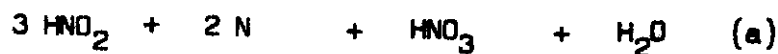


La secuencia general es :



3.4.2 Descomposición Química del Ácido Nitroso.

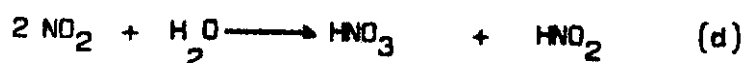
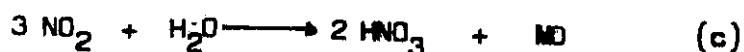
Bajo condiciones de extrema acidez en el suelo (pH menor de 5.0) el ácido nitroso se descompone para producir ácido nítrico, de acuerdo a la siguiente reacción:



Una porción del óxido nítrico formado, a su vez, es oxidado químicamente a dióxido de nitrógeno así :



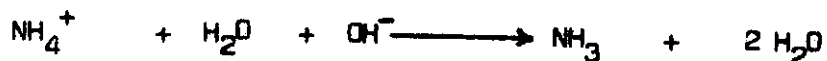
El NO_2 puede reaccionar con agua para formar ácido nítrico:



Presumiblemente el NO de (c) o el HNO_2 de (d) reaccionará de nuevo como en (b) ó (a). En esta forma no ocurrirá pérdida gaseosa; más bien todo el ácido nitroso se convertirá en ácido nítrico. Puesto que el óxido nítrico y el dióxido de nitrógeno son volátiles su escape del suelo podría ser una ruta importante de nitrógeno a la atmósfera.

3.4.3 Volatilización del Amoníaco.

Si los fertilizantes que contienen nitrógeno, en forma de amonio se colocan en la superficie de suelos alcalinos el amonio puede volatilizarse. Las sales de amonio en un medio acuoso alcalino reaccionan como sigue :



Normalmente las pérdidas de amoníaco resultantes de la volatilización pueden prevenirse colocando los materiales nitrogenados a varios centímetros debajo de la superficie del suelo. Las pérdidas se aumentan a temperaturas altas y evaporación rápida del agua del suelo. Las pérdidas de nitrógeno en forma amoniacal, también puede ocurrir independientemente del pH cuando se aplica urea al suelo y cuando el amoníaco anhidro y las soluciones amoniacales se aplican inapropiadamente al suelo.

3.4.4 El Control de las Pérdidas de Nitrógeno.

En la mayoría de los experimentos de campo, las pérdidas volátiles de nitrógeno, aunque altamente variables entre los suelos, parecen relativamente independientes de la forma de nitrógeno aplicado. Hay por supuesto, unas pocas excepciones notables tales como los suelos inundados para cultivos de arroz, en los cuales las formas amoniacales son completamente estables si el agua no es alcalina y donde los nitratos están sometidos virtualmente a pérdida completa a través de la desnitrificación.

En la mayoría de los suelos, el empleo de fertilizantes nítricos o amoniacales hace poca diferencia en relación con la magnitud de las pérdidas de nitrógeno. Esto hace aparecer como probable, que las inexplicadas pérdidas volátiles de nitrógeno, ocurren solamente después de que el nitrógeno aplicado al suelo, ha entrado dentro del sistema biológico o ha sido atacado por los organismos del suelo. Lo anterior ha estimulado a los investigadores a dirigir la atención hacia los fertilizantes nitrogenados de liberación lenta, y al estudio de las sustancias que inhiben la nitrificación.

3.5 EL NITROGENO APROVECHABLE POR LAS PLANTAS.

Las plantas como todos los organismos, requieren nitrógeno para su crecimiento y reproducción. El nitrógeno es un constituyente de todas las proteínas, de todas las enzimas y de muchos productos metabólicos intermedios en la síntesis y transferencia de energía. Debe tenerse en cuenta que las plantas leguminosas pueden obtener el nitrógeno necesario para su crecimiento a través de la fijación simbiótica con microorganismos del suelo.

El nitrógeno en el suelo está principalmente unido a la materia orgánica. En general, solamente unos pocos kilogramos de nitrógeno por

hectárea, existen en el suelo en formas minerales aprovechables para las plantas. El nitrógeno aprovechable es la forma química que puede ser fácilmente absorbida por las raíces de las plantas. Luego un requisito es que esa forma química esté presente dentro de la zona radicular.

3.5.1 Formas Químicas del Nitrógeno Aprovechable.

Las formas químicas más importantes del nitrógeno aprovechable para las plantas son: el NH_4^+ , el NO_3^- y ciertos compuestos orgánicos simples, principalmente aquellos que contienen grupos amida o amino. Los nitritos (NO_2^-) son una fuente menor del nitrógeno aprovechable.

- a. El ión amonio (NH_4^+) . El ión NH_4^+ se encuentra en la solución del suelo, como una parte del complejo de intercambio y, en sitios que restringen su intercambiabilidad. En este último caso se le llama "no intercambiable" o "fijado". La cantidad de iones NH_4^+ en la solución del suelo es extremadamente pequeña pero, está en equilibrio dinámico con la forma intercambiable y quizás con la forma no intercambiable.

El ión NH_4^+ es una fuente muy importante de nitrógeno aprovechable en praderas y en menor extensión en bosques. En praderas una gran parte de la materia orgánica del suelo consiste en residuos de raíces viejas de las cuales se libera NH_4^+ en el proceso de amonificación, en una zona fácilmente permeable por las raíces de las plantas, las cuales absorben inmediatamente cualquier NH_4^+ no utilizado por microorganismos. Naturalmente, en praderas fertilizadas con abonos comerciales habrá nitrógeno NH_4^+ en exceso para los requerimientos de las plantas y para nitrificación. Las mayores porciones de residuo orgánico en los bosques provienen de hojas depositadas en la superficie de los suelos donde el nitrógeno liberado a través de la amonificación es utilizado rápidamente por las plantas.

- b. Nitrato (NO_3^-). En la mayoría de los suelos arables, el nitrógeno inorgánico del suelo es casi todo utilizado en la forma de NO_3^- , independiente de las prácticas de fertilización. En consecuencia el NO_3^- es la fuente más importante de nitrógeno aprovechable para las plantas de cultivo.
- c. Nitrito (NO_2^-). Las plantas pueden utilizar pequeñas cantidades de NO_2^- , pero muy pocas partes por millón son tóxicas para la mayoría de las plantas. En suelos ácidos o neutros raramente se encuentran más de cantidades trazas de NO_2^- . Experimentos de campo y laboratorio han demostrado que en suelos alcalinos, pueden acumularse y persistir cantidades apreciables de NO_2^- .
- d. Nitrógeno orgánico. La úrea es una fuente de nitrógeno orgánico para las plantas, la cual puede ser absorbida también en su forma molecular por las hojas y raíces. En zonas calurosas y húmedas, las formas de nitrógeno resultantes de la hidrólisis de la úrea y de la nitrificación posterior son mucho más importantes en la nutrición de las plantas, por la rapidez de las reacciones en esos suelos.

La materia orgánica del suelo contiene de 30 a 50 por ciento de su nitrógeno como nitrógeno amino, pero las cantidades disponibles en el suelo son pequeñas. Numerosos investigadores han demostrado que los aminoácidos libres son aprovechables para muchas plantas.

3.5.2 Retención de las Formas Aprovechables de Nitrógeno en el Suelo.

La naturaleza catiónica del ión NH_4^+ , permite su retención por el material coloidal del suelo, Generalmente no está tan sometido a remoción por lixiviación como la forma NO_3^- . Sin embargo, la presencia del nitrógeno en la forma catiónica no asegura que no se pierda por lixi-

viación. Es necesario que el suelo tenga suficiente capacidad de intercambio catiónico para retener el amonio agregado porque de lo contrario será removido por el agua de percolación. Los suelos arenosos que tienen capacidad de intercambio catiónico muy baja, permiten un movimiento apreciable del ión NH_4^+ al subsuelo.

Uno de los posibles destinos del ión NH_4^+ en los suelos es su fijación por las arcillas con estructura cristalinas expandidas. La fijación del ión NH_4^+ es similar a la del ión K^+ . Los minerales de arcilla, principalmente responsables de la fijación del ión NH_4^+ son la montmorillonita, la illita y la vermiculita. La humedad y la temperatura del suelo son factores que afectan la fijación del amonio cuando éste se agraga al suelo. Hay menor fijación bajo condiciones de secamiento. La fijación del amonio también se aumenta al incrementar los niveles de potasio del suelo.

La forma NO_3^- al contrario de la forma NH_4^+ , es completamente móvil en los suelos y dentro de ciertos límites se traslada en el suelo principalmente con el agua. Bajo condiciones de lluvia excesiva, se lixivía de los horizontes superficiales. Durante períodos extremadamente secos y cuando es posible el ascenso capilar del agua, hay movimiento hacia la superficie. Bajo tales condiciones, los nitratos se acumularán en los horizontes superiores del suelo, o aún en la superficie del mismo.

Se ha reportado adsorción del ión NO_3^- en los suelos jóvenes originados de cenizas volcánicas y en los suelos del trópico y subtropico, en estado avanzado de meteorización. Estos suelos son ricos en material inorgánico amorfo que exhibe capacidad de adsorber nitratos. Los sitios de adsorción con cargas positivas están en la superficie de la caolinita, o en los óxidos hidratados de hierro y aluminio de los cuales se han dissociado grupos OH^- . León y Pratt (1974), en un andosol de Antioquia, observaron una adsorción máxima de 6,0 meq de NO_3^- por 100 g de suelo. Tanto la forma amoniacal como la de nitrato, pueden ser inmovilizadas por la microflora del suelo. En este estado, el nitrógeno no se pierde

por lixiviación.

3.5.3 Determinación del Nitrógeno Aprovechable.

De una manera general, los procedimientos para determinar el nitrógeno aprovechable se agrupan en pruebas químicas y en pruebas biológicas. Los métodos químicos son empíricos y poco satisfactorios, porque la aprovechabilidad del nitrógeno está controlada por la actividad biológica, un proceso dinámico influido por muchos factores y no hay solución extractora, o un reactivo que sea capaz de simular la función de los microorganismos o de liberar selectivamente la fracción que llega a ser aprovechable.

Algunos métodos biológicos miden el crecimiento microbial o de plantas indicadoras; otros el CO_2 producido durante el proceso de incubación y otros determinan el nitrógeno mineralizado en la incubación. Los métodos que miden el nitrógeno inorgánico, producido durante un período de incubación son los más satisfactorios ya que tienen una base racional, porque los agentes responsables de la mineralización durante la prueba, son los mismos que actúan sobre el nitrógeno orgánico en condiciones de campo y lo convierten en aprovechable.

Entre los métodos que usan plantas indicadoras, el mejor es la prueba de campo. En Colombia se ha hecho amplio uso de este método para evaluar las necesidades de fertilizantes nitrogenados, en varias regiones del país.

3.6 RESPUESTAS DE LAS PLANTAS AL NITROGENO APLICADO.

Los datos obtenidos de las investigaciones realizadas en Colombia, indican que las respuestas al nitrógeno están concentradas principalmente en las regiones más bajas y cálidas del país. En las partes más frías el nitrógeno del suelo es generalmente alto y las respuestas a este elemento son menos comunes. Se encuentran excepciones a ésta generalización en regiones en donde la erosión ha removido la capa superficial, en la



Figura 10. Respuesta del pasto Angletón (*Dichantium aristatum*) a la fertilización con N en un suelo del Valle del Cauca (Foto cortesía del Programa de Pastos y Forrajes del ICA).

cual está presente el mayor porcentaje de la materia orgánica o en sitios en donde existen deposiciones del subsuelo transportado que han enterrado esta capa debajo de la zona principal de raíces.

En las regiones tropicales del país también hay variaciones importantes en el estado del nitrógeno del suelo. Las deficiencias son mucho más comunes en las áreas de origen reciente, particularmente donde se han depositado aluviones minerales gruesos. Una zona donde las cosechas responden notablemente al nitrógeno es la del Espinal, en el Valle del Alto Magdalena donde predominan los suelos de textura gruesa, pobres en nitrógeno. En los suelos de la Costa Atlántica, se han observado respuestas similares. Por otra parte los suelos del Valle del Río Cauca suministran una mayor cantidad de nitrógeno a los cultivos y allí las respuestas son menos comunes.

Aunque las deficiencias de nitrógeno son más comunes en las áreas más cálidas, este afirma no cubre todos los cultivos. Las evidencias frecuentes, han establecido que casi todos los pastos presentan deficiencias de nitrógeno, aún en las zonas frías del país. Así se han obtenido incrementos en línea recta en los rendimientos de pastos cuando se han aplicado de cero a 1.000 kilogramos de N por hectárea por año. La fertilización nitrogenada se convierte así, en uno de los medios más eficaces para aumentar la capacidad de carga de los potreros.

3.7 RESUMEN.

Este capítulo está orientado a buscar un entendimiento de la química y aprovechabilidad del N del suelo. Se trata de su origen y se discuten los factores que afectan la fijación biológica de este elemento y también los factores que afectan los procesos de su mineralización multiplicación, con ejemplos del país. De otra parte, se hace un recuento de los procesos por los cuales se pierde el N del suelo que conduce a de los métodos de empleo para lograr mayor eficiencia en su uso. Finalmente se enuncian las respuestas obtenidas en las diferentes zonas del país al aplicar fertilizantes nitrogenados en diferentes cultivos.

3.8 PREGUNTAS.

1. Defina los siguientes procesos: a) fijación biológica del nitrógeno; b) denitrificación; c) mineralización del nitrógeno; d) amonificación; e) nitrificación.
2. Enumere los factores que afectan los siguientes procesos: a) amonificación; b) nitrificación y c) denitrificación.
3. Diagrama el ciclo del nitrógeno. Escriba las ecuaciones químicas balanceadas en aquellos pasos donde sea posible.
4. Explique brevemente como afecta la relación C/N la inmovilización del nitrógeno del suelo.
5. Cuales son los varios microorganismos responsables para la fijación de nitrógeno ?
6. Cuales son las etapas de la nitrificación y qué organismos son responsables de cada una ?
7. Que se entiende por fijación NH_4^+ . Es este fenómeno importante en suelos de Colombia ? En qué tipos de suelos podría presentarse este fenómeno ?
8. Describa las condiciones ambientales y del suelo bajo las cuales se esperaría mayores pérdidas del nitrógeno amoniacal que de la forma nítrica.
9. En qué formas se pierde el nitrógeno como gas del suelo ? . Discuta las condiciones bajo las cuales se pierde cada forma, e indique las reacciones que tienen lugar.
10. Como se podría prevenir o minimizar las pérdidas de nitrógeno gaseoso del suelo ?

11. El cultivo intensivo de los suelos dirige a una descomposición rápida de la materia orgánica y aumenta la tasa de nitrificación, Porqué ?
12. Si usted incorpora tallos de maíz a un suelo y luego siembra algodón, qué podrá ocurrirle a este cultivo ?
13. Un agricultor aplicó $(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$ a un terreno. Cuatro semanas más tarde se analizaron muestras de suelos y esencialmente todo el nitrógeno inorgánico estaba en la forma amoniacal. De algunas razones por las cuales el amonio no fué convertido a nitrato.
14. Dé algunas razones de el porqué en algunos suelos de clima frío de Colombia, con alto contenido de nitrógeno total, la papa responde apreciablemente a la aplicación de fertilizante nitrogenado.
15. Discuta brevemente la importancia de tener en cuenta las fuentes de fertilizante nitrogenado al hacer recomendaciones de fertilizantes para el cultivo de arroz.
16. La urea aplicada como fertilizante tiene residuo ácido o básico al descomponerse en el suelo? Explique.
17. Sería aconsejable el uso de sales de amonio como fertilizantes en suelos calcáreos? Explique.
18. Cómo responden los cultivos en Colombia a las aplicaciones de fertilizantes nitrogenados ? Explique brevemente.

BIBLIOGRAFIA

1. ALLEN, O.N. 1953. Inoculación de las leguminosas. Agric. Trop. (Colombia) 9:9-14.
2. ARBELAEZ, A. 1945. Bacterias nitrificantes del suelo. Agric. Trop. (Colombia) 1:9-11.
3. BARTHOLOMEW, W.E. and F.E. CLARCK. 1965. Soil Nitrogen. Wisconsin (U.S.A) American Society of Agronomy. Agronomy 10.
4. BERNAL, J. 1972. Las leguminosas como fuente de nitrógeno en pastos y rotaciones. Suelos Ecuatoriales (Colombia) 4:175-196.
5. BLASCO, M. 1972. Mineralización del nitrógeno en suelos tropicales y volcánicos. Suelos Ecuatoriales (Colombia) 4:83-92.
6. BLASCO, M. 1972. Formas de nitrógeno en el suelo y su disponibilidad para las plantas. Suelos Ecuatoriales (Colombia) 4:345-356.
7. DE BENAVIDES, G. 1972. La mineralización del nitrógeno en suelos de Colombia. Suelos Ecuatoriales (Colombia) 4:37-66.
8. DE BENAVIDES, G. 1972. Efecto del encalado en la mineralización del nitrógeno en algunos andosoles. Suelos Ecuatoriales (Colombia) 4:69-82.
9. DE ROZO, E. 1972. Fijación biológica del nitrógeno. Suelos Ecuatoriales (Colombia) 4:92-118.
10. FLOR, C.A.; D.F. ZORRILLA y J.A. GOMEZ. 1970. Estudio preliminar sobre los ensayos de fertilización de maíz en el Valle del Cauca. Agric. Trop. (Colombia) 26:127-135.

11. GOMEZ, J.A.; G.B. BAIRD y C. SANCHEZ. 1960. Respuesta del maíz a la aplicación de nitrógeno, fósforo y potasio en el Valle del Cauca . *Agric, Trop. (Colombia)* 16:17-29.
12. GOMEZ, J.A.; G. GUERRERO y A.C. McCLUNG. 1964. Informe preliminar sobre los efectos de una rotación con soya o alfalfa en la producción de maíz. *Agric. Trop. (Colombia)* 20:625-635.
13. GOMEZ, J.A. 1968. Rotación y rendimiento en maíz: informe sobre una rotación con soya e alfalfa en la producción de maíz. *Agric, Trop. (Colombia)* 24:199-206.
14. GOMEZ, J.A.; D.F. ZORRILLA y C.A. FLOR. 1969. El nitrógeno total en los suelos cultivados con maíz en el Valle del Cauca. *Agric. Trop. (Colombia)* 25:101-108.
15. GOMEZ, J.A. 1972. El nitrógeno en cultivos de climas cálidos Suelos Ecuatoriales (Colombia) 4:241-265.
16. GRAHAM, P. 1972. El ciclo del nitrógeno. Suelos Ecuatoriales (Colombia) 4:119-140.
17. JENNY, H.; F. BINGHAM and B. PADILLA-SARAVIA. 1948. Nitrogen and organic matter content of equatorial soils of Colombia, South America. *Soil Sci.* 66:173-186.
18. JENNY, H. 1950. Causes of the high nitrogen and organic matter content of certain tropical forest soils. *Soil Sci.* 69:63-69.
19. LEON, A. 1964. Estudios químicos y mineralización de diez suelos colombianos. *Agric. Trop. (Colombia)* 20(8):442-451.

20. LEON, A. y PIF: PRATT. Efectos agronómicos de la retención y lixiviación de nitratos en dos Andepts de Colombia. Turrialba (Costa Rica) 24:408-413.
21. LOPEZ, M. 1969. Problemas de fertilización en suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia. Cenicafé (Colombia) 20(2):55-57.
22. LORA, R. 1972. Estimación del nitrógeno disponible para la planta en algunos suelos de Colombia. Suelos Ecuatoriales (Colombia) 4(1):303-315.
23. LOTERO, J. y S.A. MONSALVE. 1970. Efecto de fuentes y dosis de aplicación de nitrógeno en las propiedades químicas de un suelo. Revista ICA (Colombia) 5:199-200.
24. MACRAE, L.C. and T. CASTRO. 1967. Nitrogen fixation in some tropical rice soils. Soil Sci. 103:277-280.
25. MACRAE, I.C. and R. ANCAJAS, 1970. Volatilización of amononia from submerged tropical soil. Plant and Soil Sci. 33:97-103.
26. McCANTS, C.B. 1972. Movimiento del nitrógeno en el suelo, Suelos Ecuatoriales (Colombia) 4:29-36.
27. MARIN, G. y J.A. GOMEZ. 1966. Algunos aspectos del análisis de suelos. IV. La interpretación del análisis. Agric. Trop. (Colombia) 23:368-379.
28. MICHIELIN, A. et al. 1968. Frecuencia de corte y aplicación de N en Coastal Bermuda, pangola y pará, en el Valle del Cauca. Agric. Trop.(Colombia) 24:698-709.

29. NAVAS, J. 1972. El nitrógeno en cultivos de clima frío, Suelos Ecuatoriales (Colombia) 4(1):277-300.
30. MORRIE, D.O. 1969. Observaciones on the nodulation status of rainforest leguminous species in Amazonia and Guayana. Trop. Agric. 46:145-151.
31. PINCK, L.A.; R.S. DYAL and F.E. ALLISON. Protein montmorillonite complexes, their preparation and the effects of soil microorganisms on their decomposition. Soil Sci. 78:109-118.
32. PORTER, L.K. and AR. GRABLE. 1969. Fixation of atmospheric nitrogen by monlegomes in wet montain meadows. Agron, J. 61:521-523-
33. ROJAS, C.A. y J. LOTERO. 1970. Estudio comparativo de forraje, raíces y nodulación y fijación de nitrógeno en trace leguminosas. Revista ICA (Colombia) 5:221-242.
34. RUSSEL, E.W. 1963. Soil condition and plant growth Londres, Longmans Green and Company. Ltda. 688 p.
35. SANCHEZ, P.A. 1972. Fertilización y manejo del nitrógeno en el cultivo del arroz tropical, Suelos Ecuatoriales (Colombia) 4:197-240.
36. TAFUR, N y M. BLASCO. 1968. El nitrógeno en los suelos del Valle del Cauca, Acta Agronómica (Colombia) 18(1):7-16.
37. THERON, J.J. 1951. The influence of plants on the mineralization of nitrogen and the maintenance of organic matter in soil. J. Agric. Sci. 41:289-296.

38. VALENCIA, G. 1972. El nitrógeno en la zona cafetera. Suelos Ecuatoriales (Colombia) 4(1):267-276.
39. VIETS, Jr. F.G. 1965. The plant's need for and use of nitrogen. En: Bartholomew, W.E. y F.E. Clark. Soil nitrogen, p. 503-549. Agronomy. American Society of Agronomy, Wisconsin (U.S.A)
40. VOLK, G.M. 1959. Volatile loss of ammonia following surface application of urea to turf or bare soils. Agron. J. 51:746-749.