

NITRIFICACION EN ALGUNOS SUELOS DE MEXICO

Por Hernando González Camargo¹
Alfredo Echegaray A.²
Francisco Baldovinos de la P.³

Sinopsis

El presente trabajo se efectuó con el propósito de conocer la *capacidad nitrificante* de seis suelos de la parte central de México, con diferentes características físicas, químicas, biológicas y desarrollados bajo condiciones ambientales diferentes.

En el campo los suelos fueron tratados con soluciones acuosas de sulfato de amonio y urea conteniendo respectivamente 100 ppm de nitrógeno. A los 4 y 10 meses después de haber sido aplicados los fertilizantes nitrogenados, se cuantificó el N-NH₄ y N-NO₃ presentes, así como la flora nitrificante. Los resultados indican que comparativamente con los suelos testigos, a los 4 meses se encuentran las mayores cantidades de N-NO₃ en los suelos tratados con sulfato de amonio.

En el experimento de incubación en el laboratorio, los suelos fueron tratados con las soluciones acuosas de sulfato de amonio y urea y sometidos a condiciones de humedad y temperatura controladas. La producción de nitratos fue estadísticamente significativa en todos los suelos a excepción de los del Lago de Texcoco y San Juan del Río. Se encontró también que la mayor producción de nitratos correspondió a los suelos tratados con sulfato de amonio.

Summary

This study was carried out in order to find out the different nitrifying capacities of six soils of the central part of Mexico. These soils have been developed under different environmental conditions. Thus, the six soils present different characteristics from the physical, chemical, and biological point of view.

Water solutions of ammonium sulfate and urea containing 100 ppm of nitrogen respectively, were applied to the soils in the field. After four months of having applied the fertilizers, and then, after ten months, the amounts of N-NH₄ and N-NO₃ were measured in each soil. Also, it was estimated the amount of nitrifying flora. Results indicated that in comparison to the check soils, the ammonium sulfate treated soils had the largest amounts of N-NO₃.

In the incubation experiment carried out in the laboratory, under controlled temperature and humidity, water solutions of urea and ammonium sulfate were added to the soil samples. The production of nitrates was statistically significant for all the soils except for those of Texcoco and San Juan del Río. It was also found that the highest production of nitrates was that of the soils treated with ammonium sulfate.

-
- 1) Maestro en Ciencias, Instituto Colombiano de la Reforma Agraria, Bogotá, Colombia.
 - 2) Profesor de Microbiología de Suelos, Rama de Suelos, C.P. Chapingo, Méx.
 - 3) Profesor de Nutrición de Plantas, Rama de Suelos, C.P. Chapingo, Méx. (Fallecido)

Introducción

El fenómeno de la nitrificación en el suelo es un proceso biológico muy importante, ya que de él depende el que las plantas dispongan de suministros adecuados de nitrógeno en forma de nitratos, que es la forma nitrogenada que más fácilmente absorben las plantas.

Los factores ecológicos que afectan a la microflora edáfica y más concretamente a la microflora nitrificante, han sido divididos por Seifert, 1964 (en 12) en primarios y secundarios. Entre los primeros se incluyen la humedad, la temperatura y la aereación, y su efecto sobre los microorganismos es directo. Los secundarios son los que influyen a través de los factores primarios, como por ejemplo la textura del suelo. Existen desde luego otros factores del suelo que actúan sobre la nitrificación, como son el pH, suministro de nutrimentos, contenido de materia orgánica, etc.

La gran cantidad de trabajos que aparecen en la literatura científica de los últimos 5 años, para determinar la capacidad de nitrificación de un suelo, así como para predecir la necesidad de fertilizantes nitrogenados en el mismo, a la vez que dan idea de la importancia del fenómeno, recalcan también las dificultades que aún existen para poder correlacionar los trabajos de laboratorio con los resultados obtenidos en el campo.

Teniendo en cuenta lo anterior, se planeó el presente experimento con el fin de conocer la capacidad nitrificante de algunos suelos de México en términos de sus propiedades físicas, químicas y biológicas.

Revisión de literatura

La nitrificación es el proceso por el cual el amonio es convertido a nitratos. Este proceso es efectuado, en su mayor parte, por bacterias clasificadas como organismos autótrofos (16), porque la energía para la síntesis de sus compuestos orgánicos la derivan de la oxidación de sales inorgánicas simples y el carbono del CO₂ de la atmósfera que los rodea.

Generalmente se considera que la nitrificación tiene lugar en dos etapas distintas estrechamente relacionadas, llamadas nitritación y nitratación (15).

Primero, el ión amonio es convertido a nitritos principalmente por bacterias del género *Nitrosomonas*. La reacción puede representarse así:



El segundo paso es llevado a cabo por un grupo de organismos de los cuales el más importante es *Nitrobacter* sp:



El proceso de nitrificación en el suelo es afectado por muchos factores ecológicos, entre los cuales están los siguientes:

pH. Las bacterias nitrificantes son muy sensibles a los cambios de pH del suelo (1). En términos generales, los suelos con pH alto nitrifican el amonio más

rápidamente que los suelos con pH bajo (2). Los límites de pH en los cuales tiene lugar la nitrificación son entre 5.5 y 9, siendo el óptimo alrededor de 8.0 (9). En este proceso es tan importante el pH, que Morrill y Dawson (17) concluyen que sólo aquellos factores asociados con él tienen influencia significativa sobre la nitrificación.

Aireación. Como los organismos nitrificantes son aerobios estrictos, requieren de cantidades adecuadas de oxígeno para sus actividades metabólicas, ya que en las reacciones de oxidación se requiere oxígeno molecular (18, 24). Bajo condiciones anaeróbicas el amonio se puede acumular, ya que los organismos amonificadores son menos sensibles a condiciones desfavorables en el suelo (6).

Humedad del suelo. Las bacterias nitrificantes son más sensibles a excesos de humedad que a condiciones de extrema sequía en el suelo (23). Como regla general, un descenso del contenido de humedad por debajo del óptimo para el crecimiento de las plantas es acompañado por una disminución de la nitrificación. Algunos autores consideran que el contenido de humedad óptimo para la nitrificación está alrededor de la capacidad de campo o por encima de ella (13) y (18).

Temperatura del suelo. Está considerada como uno de los más importantes factores ambientales que afectan la oxidación del amonio a nitratos en el suelo (19). En general, entre más baja es la temperatura más lenta es la nitrificación (3) y (11). Los límites que se consideran más apropiados van desde 4 a 40°C, siendo el óptimo alrededor de 30°C (24).

Contenido de nutrimentos. Las bacterias nitrificantes necesitan de un adecuado suministro de calcio, potasio, fósforo, azufre y magnesio y cierta cantidad de fierro, cobre, molibdeno y quizá otros (23). En suelos de regiones húmedas y con bajas temperaturas la nitrificación es muy escasa a pesar de que haya buena cantidad de calcio y potasio en el suelo y se detiene definitivamente si el contenido de potasio es bajo (11).

Materia orgánica. Las relaciones de la materia orgánica del suelo con el metabolismo y actividades de la flora nitrificante son bastante complejas y no conocidas perfectamente.

Abundancia del ión amonio. Se requiere de cantidades adecuadas de amonio para que la nitrificación pueda efectuarse normalmente (23). Cuando en el suelo existen compuestos nitrogenados fácilmente atacables, el amoníaco puede acumularse rápidamente y ser tóxico para *Nitrobacter sp.*, con la consiguiente acumulación de nitritos (6) y (17). El amonio generalmente no es tóxico para las bacterias nitrificantes ya que no cruza las barreras celulares a la velocidad con la que lo hace el amoníaco (25).

Capacidad de intercambio de cationes. Cuando la capacidad de intercambio de cationes es alta, el amoníaco de la solución del suelo es absorbido en parte por el complejo de cambio y por consiguiente su toxicidad para *Nitrobacter sp.* se reduce produciéndose la nitrificación. Si la capacidad de intercambio de cationes del suelo es baja, la velocidad de nitrificación disminuye debido a dos factores interrelacionados que son: a) disminución del hidrógeno intercambiable debido al aumento del amoníaco en la solución del suelo y b) el efecto sobre el pH de la solución del suelo (23).

Efecto de la fuente de nitrógeno agregado. En suelos ácidos y ligeramente alcalinos, de manera general la velocidad de nitrificación es mayor para el hidróxido de amonio, después para el sulfato de amonio y menor para el nitrato de amonio. La velocidad de nitrificación de la urea es muy similar a la del hidróxido de amonio (5). En suelos calcáreos y alcalinos, las sales de amonio nitrifican más rápidamente que el hidróxido de amonio.

Población de microorganismos nitrificantes. Existe una estrecha correlación entre la cantidad de nitratos producidos en el suelo y el número de microorganismos presentes en él (22).

Métodos y materiales

Para el presente trabajo se seleccionaron seis suelos de la parte central de México con diferentes características físicas y químicas, algunas de las cuales aparecen en los cuadros 1 y 2.

En cada uno de los sitios escogidos se delimitaron 3 parcelas adyacentes de un metro cuadrado cada una, las cuales, en todos los casos, recibieron los tratamientos de fertilizantes nitrogenados siguientes:

Parcela 1 — Testigo (sin nitrógeno)

Parcela 2 — 100 ppm de nitrógeno en forma de urea

Parcela 3 — 100 ppm de nitrógeno en forma de sulfato de amonio.

De cada uno de los fertilizantes anteriores se utilizaron, por metro cuadrado, 42.86 y 94.28 gramos, respectivamente, los cuales se agregaron en soluciones de un litro cada una en el centro de las parcelas en un radio aproximado de 10 a 15 cm después de remover la cubierta de vegetación, condición que se mantuvo por el tiempo que duró el experimento, el cual se inició en noviembre de 1966.

De las parcelas testigo se tomaron muestras de suelo a una profundidad de 20 cm, las que se dividieron en dos partes: la primera se utilizó para la cuantificación inmediata de amonio y nitratos presentes al principio del experimento, y para las determinaciones biológicas (cuantificación de organismos nitrificantes y pruebas de capacidad nitrificante) siendo por tal motivo conservada en el refrigerador a una temperatura de aproximadamente 4°C. La segunda parte fue secada al aire, molida y tamizada a través de un tamiz de 2 mm. y utilizada en las determinaciones físico-químicas de caracterización de los suelos e identificación de minerales.

Con el propósito de estudiar la influencia de las condiciones climáticas y de las propiedades físico-químicas y biológicas del suelo en la oxidación biológica (nitrificación) de las fuentes nitrogenadas añadidas, se recolectaron muestras de suelo del centro de las parcelas de todos los sitios a intervalos de 4 y 10 meses (marzo del 67 y septiembre del mismo año, respectivamente) después de haber sido aplicados los fertilizantes. De estas muestras de inmediato se utilizó una parte para las determinaciones de nitrógeno amoniacal y de nitratos, y otra se guardó en el refrigerador a una temperatura de 4°C para emplearse posteriormente en la cuenta de bacterias nitrificantes.

C U A D R O 1

Características Generales de los Suelos en Estudio

Suelo. No.	Estado	Altura msnm	Temp. media anual °C	Precipi- tación anual mm	Vegetación dominante	Topografía
1. (Tehuixtla)	Mor.	1500	23.2	825.5	Pastos Caña de azúcar	Ondulada Plana
2. (Zacatepec)	Mor.	2470	23.2	825.5	Bosque de coníferas	Quebrada
3. (Río Frío)	Méx.	3200	—	—	Pastos	Ondulada
4. (Huexotla)	Méx.	2350	14.2	491.0	Sin vege- tación	Plana
5. Lago de Texoco)	Méx.	2250	14.2	491.0		
6. San Juan del Río)	Qro.	1896	16.3	618.0	Pastos	Ondulada

Para la prueba de capacidad de nitrificación en el laboratorio se empleó el método de incubación, manteniendo las muestras húmedas a la capacidad de campo y a una temperatura de 28-30°C. agregando a los matraces con el suelo las mismas cantidades, proporcionales, de los fertilizantes empleados en el campo, excepto en los testigos. En las muestras tratadas se hicieron 2 repeticiones para cada tratamiento. El período de incubación fue de 30 días, al final del cual se determinaron el amonio y los nitratos.

La cuenta de microorganismos nitrificantes se efectuó en las muestras de suelo de las parcelas testigo recolectadas al momento de iniciar el experimento, y posteriormente en las muestras de las tres parcelas de todos los sitios a los 10 meses de haberse aplicado los fertilizantes.

Las determinaciones efectuadas en el laboratorio fueron:

- a) color
- b) pH
- c) textura
- d) materia orgánica (citado en 11)
- e) conductividad eléctrica (citado en 21)
- f) potasio, calcio y magnesio hidrosolubles (citado en 14)
- g) capacidad de intercambio de cationes (citado en 10)
- h) fósforo aprovechable (citado en 7)
- i) nitrógeno total (citado en 14)
- j) nitratos (citado en 20)
- k) amonio (citado en 8)
- l) identificación de minerales (citado en 14)
- m) cuantificación de microorganismos nitrificantes (citado en 4)

C U A D R O 2

Algunas Características Físicas y Químicas de los Suelos al Iniciarse el Estudio.

Suelo No.	Color	Textura	pH 1:1	C.E. mmhos/ cm	M.O. %	N total	P ppm	K ppm	Ca ppm	Mg ppm	C.I.C. meq/ 100 g
En seco:											
5 Y 5/1											
En húmedo:											
1	Gris 10 YR 4/1 Gris oscuro en seco 10 YR 4/1	Mig. arenoso	8.10	0.69	0.30	0.078	10.80	37.5	154.3	26.7	16.0
2	Gris oscuro 10 YR 2/1 Negro	Mig. arcilloso	7.80	1.50	1.47	0.117	12.30	11.0	253.5	141.7	36.5
En seco:											
10 YR 4/3											
3	Café En húmedo: 10 YR 3/2	Franco	6.95	0.35	4.49	0.198	0.10	24.0	33.10	33.4	24.7
Café gris muy oscuro En seco:											
10 YR 3/2											
Café gris muy oscuro En húmedo:											
4	10 YR 2/2	Mig. arenoso	7.51	0.39	1.20	0.072	40.0	6.0	55.1	46.8	11.5
Café muy oscuro En seco:											
10 YR 5/1											
5	Gris En húmedo: 10 YR 3/1	Mig. arenoso	10.2	23.0	2.81	0.110	0.05	940.0	22.04	6.7	53.0
Gris muy oscuro En seco:											
5 YR 3/4											
6	Café rojo oscuro En húmedo: 5 YR 3/3	Arcilloso	6.15	0.38	2.14	0.092	0.04	5.0	33.4	34.0	22.5
Café rojo oscuro											

Metodología Estadística para el experimento de laboratorio (Capacidad de Nitrificación). La producción de nitrógeno en nitratos fue analizada estadísticamente considerando para cada suelo un diseño completamente al azar, con 2 repeticiones, excepto para el testigo.

Se hizo análisis de varianza para cada suelo individual los cuales no se incluyen en este resumen, y un análisis combinado para los seis suelos (Cuadro 5), para lo cual surge un arreglo factorial 6×3 (6 suelos 3 fuentes) con diferente número de repeticiones en un diseño completamente al azar. Para el análisis combinado se hizo una descomposición de los grados de libertad de tratamientos, mediante las siguientes comparaciones ortogonales previamente diseñadas:

Comparación 1 Testigo vs fuentes de nitrógeno

Comparación 2 Entre fuentes de nitrógeno.

También se hizo una descomposición para suelos, utilizando como criterio de comparación agrupaciones de suelos en base al pH. Las comparaciones fueron:

Comparación 1 Suelos 2, 3 y 4 vs 1, 5 y 6

Comparación 2 Suelos 1 y 5 vs 6

Comparación 3 Suelos 1 vs 5

Comparación 4 Suelos 2 vs 3 y 4

Comparación 5 Suelos 3 vs 4.

Estas comparaciones sirvieron de base para la descomposición de la Interacción Suelos x Tratamiento, la cual había resultado significativa.

Resultados y discusión

Los resultados de la cuantificación de organismos nitrificantes aparecen en los cuadros 3 y 4:

Experimento de campo

Contenido de $N-NH_4^+$

Según se puede apreciar en los histogramas 1 al 6 los mayores contenidos de nitrógeno amoniacal fueron encontrados en las muestras de suelo tomadas a

C U A D R O 3

Cuantificación de Organismos Nitrificantes (Iniciación del Experimento, Noviembre de 1966)

Suelo No.	Microorganismos por gramo de suelo	
	Nitrosomonas sp.	Nitrobacter sp.
1	700	50
2	400	100
3	2.600	0
4	2.800	500
5	0	0
6	0	0

C U A D R O 4

Cuantificación de Organismos Nitrificantes (10 Meses Después de la Iniciación del Experimento, Septiembre de 1967).

Suelo No.	Tratamientos	Microorganismos por gramo de suelo	
		Nitrosomonas sp.	Nitrobacter sp.
1	Testigo	360 x 10 ⁸	50
	Urea	360 x 10 ⁸	4
	(NH ₄) ₂ SO ₄	22 x 10 ⁷	0
2	Testigo	28 x 10 ⁸	500
	Urea	34 x 10 ¹	40
	(NH ₄) ₂ SO ₄		
3	Testigo	5 x 10 ⁵	260
	Urea	360 x 10 ⁸	14 x 10 ³
	(NH ₄) ₂ SO ₄	320 x 10 ⁸	1.000
4	Testigo	90 x 10 ⁸	100
	Urea	18 x 10 ⁵	12 x 10 ³
	(NH ₄) ₂ SO ₄	50 x 10 ³	12 x 10 ⁵
5	Testigo	7 x 10 ²	0
	Urea	1 x 10 ³	10
	(NH ₄) ₂ SO ₄	7 x 10 ²	40
6	Testigo	3 x 10 ²	4
	Urea	5 x 10 ²	40
	(NH ₄) ₂ SO ₄	3 x 10 ²	10

los 4 meses de aplicados los fertilizantes, especialmente en los suelos 3, 5 y 6. Esto puede atribuirse a que estos suelos tienen mayor contenido de materia orgánica, la que al mineralizarse proporciona el amonio, además son suelos bastante evolucionados que contienen minerales expandibles que retienen al amonio y retardan su oxidación biológica a nitratos. Una excepción a esto lo constituye el suelo 3 que es joven y con abundancia de cristobalita y feldespatos, pero que tiene suficiente cantidad de materia orgánica. En los demás (Suelos 1, 2 y 4) las diferencias con el muestreo efectuado al comenzar el experimento son muy pequeñas. El bajo contenido de amonio puede deberse a que estos suelos contienen poca materia orgánica, y su capacidad de intercambio de cationes es baja por ser ricos en feldespatos y cristobalitas. Es de suponer que esta similitud en los resultados indique un retorno paulatino de los suelos a su estado inicial (estabilización) ya que después de 4 meses de aplicados los tratamientos se espera que el efecto de los fertilizantes haya desaparecido, si no completamente, al menos en su mayor parte.

En cuanto al efecto de los fertilizantes añadidos, para las determinaciones efectuadas en marzo de 1967, todos los suelos muestran la misma tendencia. Se puede observar que la mayor cantidad de nitrógeno amoniacal se encontró en las parcelas tratadas con sulfato de amonio, siguiendo las tratadas con urea. El nivel de N-NH₄ en los testigos fue siempre inferior al de las parcelas tratadas, y muy cercano al nivel inicial.

En las muestras recolectadas a los 10 meses (septiembre de 1967) el descenso en el contenido de nitrógeno amoniacal fue notable con relación al muestreo anterior en todos los suelos, especialmente en el 1, 2, 3 y 4, lo que pudo ser debido a la proliferación de *Nitrosomonas sp.* (Cuadro 4) la cual es de esperarse que haya oxidado al amonio ya sea hasta la forma de nitritos o bien a uno de los compuestos intermedios.

Los suelos 5 y 6 presentan contenidos relativamente altos de $N-NH_4$. En estos suelos, y para esta fecha de muestreo, la población de *Nitrosomonas sp.* fue

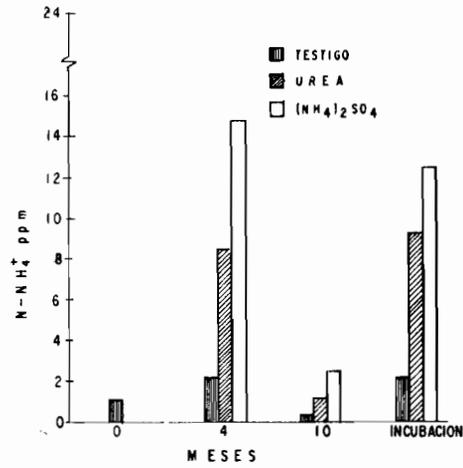
CUADRO 5

Análisis de Varianza Combinado. Variable Analizada NO_3 ppm.

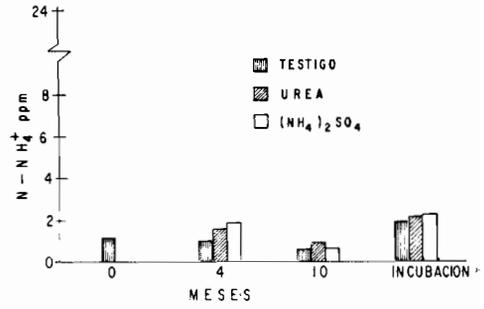
F de V.	G.L.	S. C.	C.M.	F.c.	F.t. 5% 4.75	1% 9.33
Suelos	5	250.5774	50.1154	223.1317	**	**
Comp. 1	1	172.1286	172.1286	766.3784	**	**
Comp. 2	1	23.0914	23.0914	102.8112	**	**
Comp. 3	1	17.1610	17.1610	76.4069	**	**
Comp. 4	1	18.1742	18.1742	80.9180	**	**
Comp. 5	1	20.0222	20.0222	89.1460	**	**
Tratamientos	2	204.9361	102.4680	456.2243	**	**
Comp. A	1	109.6149	109.6149	488.0449	**	**
Comp. B	1	95.3212	95.3212	424.4043	**	**
Suelos x Trats.	10	145.1671	14.5167	64.6335	**	**
$I_{11} \times A$	1	21.3448	21.3448	95.0347	**	**
$I_{21} \times B$	1	107.8232	107.8232	480.0676	**	**
$I_{32} \times A$	1	4.6099	4.6099	20.5249	**	**
$I_{42} \times B$	1	0.9283	0.9283	4.1331		
$I_{53} \times A$	1	4.4890	4.4890	19.9866	**	**
$I_{63} \times B$	1	0.0098	0.0098			
$I_{74} \times A$	1	0.5467	0.5467	2.4341		
$I_{84} \times B$	1	0.0600	0.0600			
$I_{95} \times A$	1	3.1922	3.1922	14.2183	**	**
$I_{105} \times B$	1	2.1632	2.1632	9.6313	**	**
Error	12	2.6961	0.2246			
Total	29	603.3767				

muy baja, posiblemente insuficiente para que todo el amonio presente pudiera ser biológicamente transformado, además de que son suelos ricos en minerales expandibles.

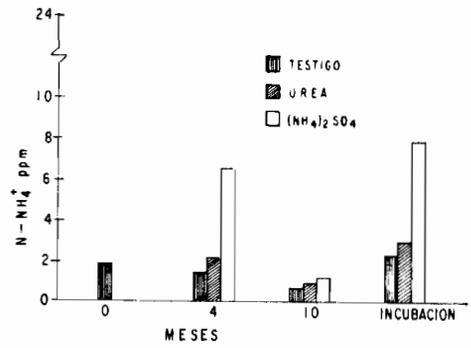
Producción de $N-NO_3$. Con excepción del suelo 1, las columnas de los histogramas de la producción de nitrógeno de nitratos para los demás suelos (histogramas 7 a 12) siguen la misma tendencia que las correspondientes para el nitrógeno amoniacal en esta misma fecha (marzo de 1967) es decir, que la mayor cantidad de $N-NO_3$ se encontró en las parcelas que recibieron sulfato de amonio, siguiendo en su orden las tratadas con urea, y por último las parcelas testigo, sin fertilizante.



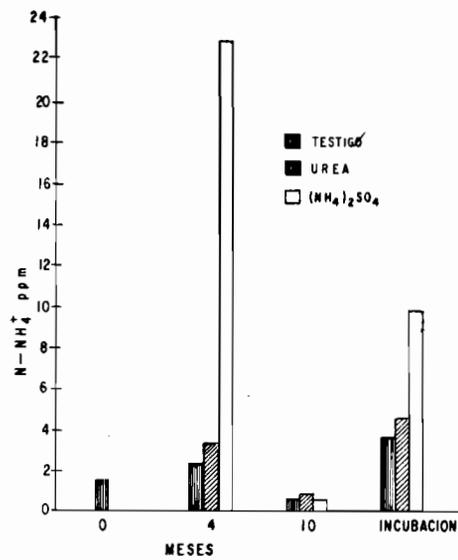
Histograma 1. Determinación de $N-NH_4^+$.
Suelo No. 1. Tehuixtla, Mor.



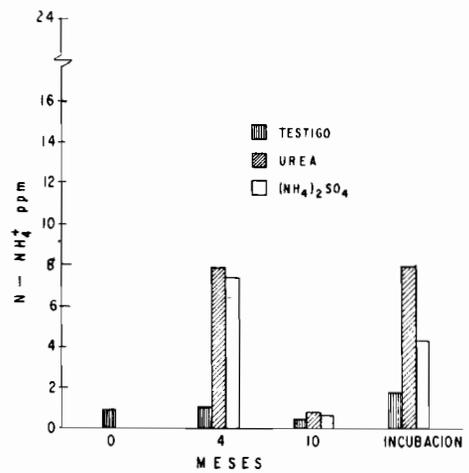
Histograma 2. Resultados de las determinaciones de $N-NH_4^+$.
Suelo No. 2. Campo Experimental de Zacatepec, Mor.



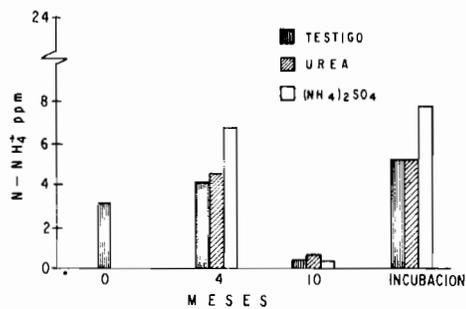
Histograma 4. Resultados de las determinaciones de $N-NH_4^+$.
Suelo No. 4. Huexotla, Méx.



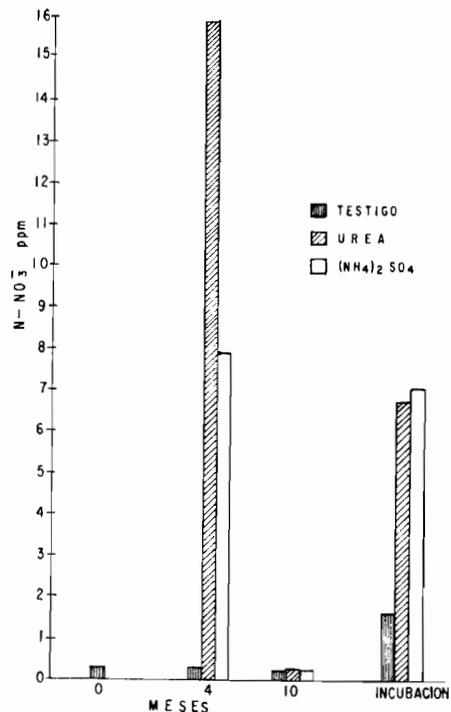
Histograma 3. Resultados de las determinaciones de $N-NH_4^+$.
Suelo No. 3. Río Frío, Mex.



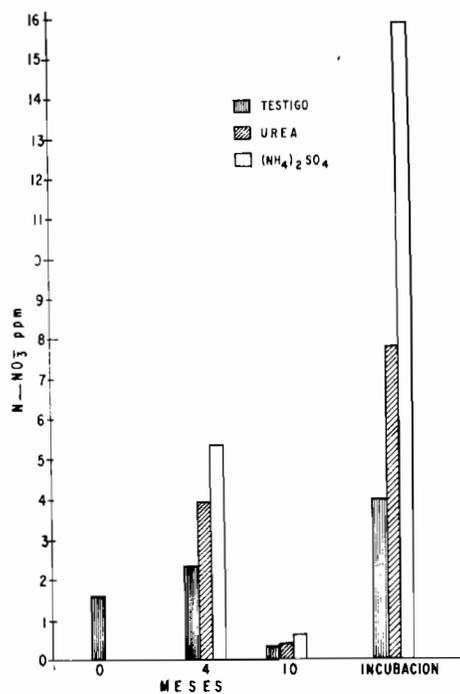
Histograma 5. Resultados de las determinaciones de $N-NH_4^+$.
Suelo No. 5. Lago de Texcoco, Méx.



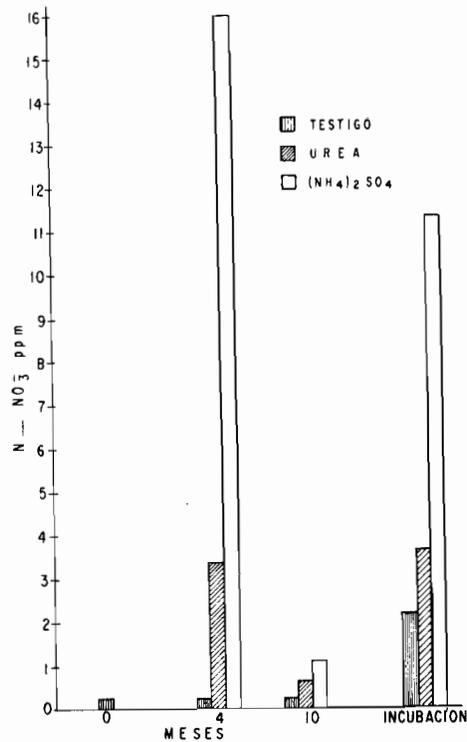
Histograma 6. Resultados de las determinaciones de $N-NH_4^+$ ppm
Suelo No. 6. San Juan del Río, Qro.



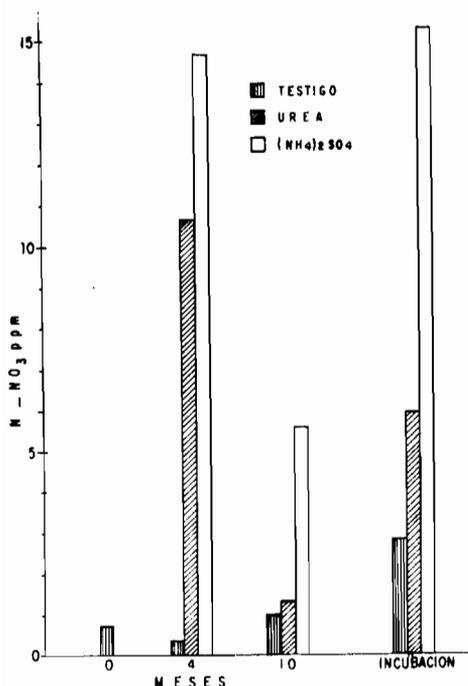
Histograma 7. Resultados de las determinaciones de $N-NO_3^-$ ppm
Suelo No. 1. Tehuixtla, Mor.



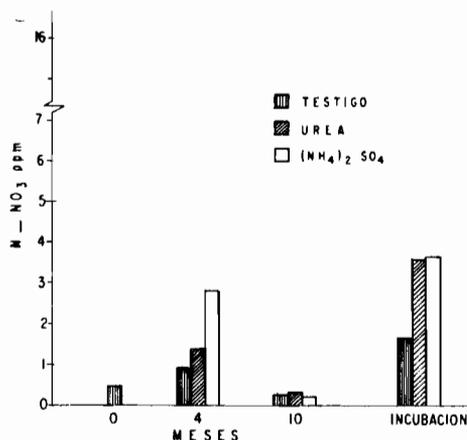
Histograma 8. Resultados de las determinaciones de $N-NO_3^-$ ppm
Suelo No. 2. Campo Experimental de Zacatepec, Mor.



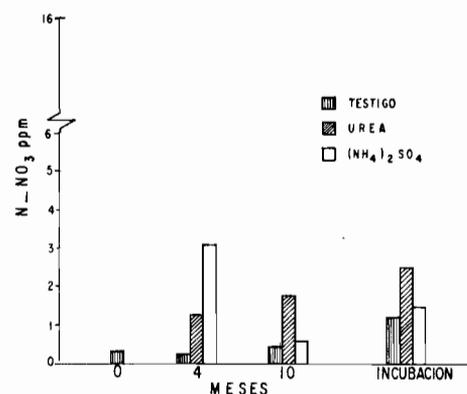
Histograma 9. Resultados de las determinaciones de $N-NO_3^-$ ppm
Suelo No. 3. Río Frío, Méx.



Histograma 10. Resultados de las determinaciones de N-NO₃ Suelo No. 4. Huexotla, Méx.



Histograma 11. Resultados de las determinaciones de N-NO₃ Suelo No. 5. Lago de Texcoco, Méx.



Histograma 12. Resultados de las determinaciones de N-NO₃ Suelo No. 6. San Juan del Río, Qro.

En el caso del suelo 1, parece que se desarrolló un pH bastante alcalino al producirse la hidrólisis de la urea, por lo cual la nitrificación en la parcela que recibió este fertilizante se vio inicialmente impedida, hasta que gradualmente se fue normalizando el pH por la acidez debida a las reacciones de nitrificación.

El caso contrario se presentó, en los suelos 3 y 4, es decir, que la nitrificación del amonio de la urea se produjo a una mayor velocidad que la del amonio del sulfato de amonio, de ahí que fue mayor la cantidad de N-NO₃ encontrada en las parcelas que recibieron este último fertilizante. El pH de estos suelos es de 6.95 y 7.51 respectivamente; al producirse la hidrólisis de la urea este pH se incrementó con lo cual se aceleró el proceso de nitrificación.

Respecto a la permanencia de los nitratos en estos suelos, debe hacerse notar que la precipitación pluvial al principio del experimento y al hacerse el segundo

muestreo del suelo 4. fue muy baja (79.1 mm). Para el suelo número 3, su mayor contenido de materia orgánica compensa las posibles pérdidas de nitratos que hayan podido ocurrir.

Los otros tres suelos 2, 5 y 6, mostraron contener muy poca cantidad de nitrógeno nítrico, particularmente los dos últimos debido a sus malas características físicas, químicas y biológicas.

En el tercer muestreo (septiembre de 1967), las cantidades de $N\text{-NO}_3$ disminuyeron notablemente. Para esta fecha ya la acción de los fertilizantes desaparece por completo, lo cual es lógico deducir en primer lugar por el tiempo transcurrido desde su aplicación hasta el momento del presente muestreo, y en segundo lugar por el hecho de que los niveles de nitrógeno nítrico encontrados son muy semejantes a los existentes al comienzo del experimento, además de que la precipitación pluvial fue muy abundante en todos los suelos a partir del mes de junio.

Experimento de laboratorio.

Contenido de $N\text{-NH}_4^+$

En general, la cantidad de nitrógeno amoniacal encontrada en todos los suelos al final del período de incubación fue baja. Con todo, en los seis suelos se detectaron diferencias en el contenido de nitrógeno amoniacal favorable a las muestras tratadas (histogramas 1 a 6), en relación con los testigos, y salvo el suelo 5, en el cual fue mayor esta cantidad en las muestras que recibieron urea, en todos los demás los mayores valores observados corresponden a las muestras que recibieron sulfato de amonio.

Producción de $N\text{-NO}_3^-$

Según los datos del análisis de varianza combinado, resultaron significativas las interacciones 1 x A, 1 x B, 2 x A, 3 x A, 5 x A y 5 x B, lo cual quiere decir que hubo interacción suelos por tratamiento. En las demás, estas interacciones no fueron significativas, aunque sí las comparaciones entre suelos, los cuales fueron agrupados en la base al pH.

En general, se observó que la mayor nitrificación la produjeron los suelos con pH intermedio, y dentro de éstos, aquellos con pH mayor. Los de pH extremos, suelos 5 y 6, la producción de nitrógeno nítrico fue muy baja.

Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos, en campo y en laboratorio, se pueden deducir las siguientes conclusiones generales:

1. La mayor cantidad de nitrógeno de nitratos formada, dentro del grupo estudiado, se encontró en los suelos con valores de pH intermedios (suelos 1, 2, 3 y 4, con pH de 8.1, 7.8, 6.95 y 7.50 respectivamente). La producción de $N\text{-NO}_3$ en los suelos 5 (pH 10.2) y 6 (pH 6.15) fue bastante baja.

2. De los fertilizantes empleados el que originó mayor cantidad de $N\text{-NO}_3$ a los 4 meses de agregado, fue el sulfato de amonio en los suelos 2, 3 y 4, por lo cual es recomendable el uso de esta fuente nitrogenada para los suelos antes mencionados.

3. En los suelos 1 y 6, es indiferente el empleo de urea o sulfato de amonio, y su selección deberá basarse principalmente en factores económicos (costo) ya que en términos generales la velocidad de nitrificación de ambos fertilizantes fue similar.

4. En suelo 5, por tener un pH alcalino y por poseer características físico-químicas adversas a la nitrificación, no se recomienda el empleo de fertilizantes hasta tanto no se efectúen trabajos de rehabilitación.

Bibliografía

1. ALEXANDER, M. Introduction to Soil Microbiology. New York. John Wiley & Sons. Inc. 472 p., 1961.
2. ALLISON, F. E. AND STERLING, L. D. Nitrate formation from soil organic matter in relation to total nitrogen and cropping practices. Soil Sci. (67): 239-252, 1949.
3. ANDERSON, C. E. AND PURVIS, E. R. Effect of low temperatures on nitrification of ammonia in soils. Soil Sci. (80): 313-318, 1955.
4. BARKWORTH, M. AND BATESON, M. The population level of presumptive Nitrosomonas and Nitrobacter in some english soils. Plant and Soil. (22): 220-228, 1965.
5. BROADBENT, F. E., K. B. TYLER, AND G. N. HILL. Nitrification of ammoniacal fertilizers in some California soils. Hilgardia (27): 247-267, 1957. 8
6. CHAPMAN, H. D., AND LIEBIG, G. F. JR. Field and laboratory studies on nitrite accumulation in soils. SSSA Proc. (16): 267-282, 1952.
7. COREY, R. B. Curso de Química Avanzada de Suelos. Chapingo, México. Colegio de Postgraduados. 1965.
8. ECHEGARAY, A. A. Prácticas de Microbiología de Suelos, Chapingo, México. Colegio de Postgraduados. 1966.
9. ENO, C. F. AND W. G. BLUE. The effect of anhydrous ammonia on nitrification and the microbiological population in sandy soils. SSSA Proc. (18): 178-181, 1954.
10. FERNÁNDEZ, G. R. Manejo de suelos bajo riego. Chapingo, México. Colegio de Postgraduados, 1965.
11. GARBOSKY, A. J. AND GIAMBIAGI, N. The survival of nitrifying bacteria in the soil. Plant and Soil. (17): 271-278, 1962.
12. GIAMBIAGI, N. Nuevas tendencias en los estudios de nitrificación en suelos. I.D.I.A. No. 240: 25-41, 1967.
13. IZAGUIRRE, V. A. Y FERNÁNDEZ, G. R. Relación entre el potencial de humedad del suelo y la producción de nitratos. Memorias del Primer Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. México. p. 465-473, 1963.
14. JACKSON, M. L. Soil Chemical Analysis. New Jersey. Prentice Hall Inc. 498 p. 1959.
15. LYON, T. L. BUCKMAN, H. O. AND BRADY, N. C. The Nature and Properties of Soils. New York. The MacMillan Co. 567 p., 1961.
16. MCGARITY, L. W. Denitrification studies on some south australian soils. Plant and Soil. (14): 1-20, 1961.
17. MILLER, R. D. AND JOHNSON, D. D. The effect of soilmoisture tensión on carbon dioxide evolution, nitrification and nitrogen mineralization. SSSA Proc. (28): 644-647, 1964.
18. MOBBIL, L. G. AND DAWSON, J. E. Patterns observed for the oxidation of ammonium to nitrate by soil organisms. SSSA Proc. (31): 757-760, 1967.
19. PARKER, D. T. AND LARSON, W. E. Nitrification as affected by temperature and moisture of mulched soils. SSSA Proc. (26): 238-242, 1963.
20. PRINCE, A. L. Determination of total nitrogen, ammonia, nitrates and nitrites in soils. Soil. Sci. (59): 47-52, 1945.
21. RICHARDS, L. A. Editor. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Manual No. 6°. U.S.D.A. Traducción hecha por el I.N.I.A.. S.A.G. México, 172 pp., 1962.
22. SABEY, B. R., FREDERICK, L. R. AND BARTHOLOMEW, W. V. The formation of nitrate from ammonium nitrogen in the soil: III Influence of temperature and initial population of nitrifying organisms on the maximum rate and delay period. SSSA Proc. (23): 462-465, 1959.
23. SMITH, J. H. Relationships between soil cation exchange capacity and the toxicity of ammonia to the nitrification process. SSSA Proc. (28): 640-643, 1964.
24. TISDALE, S. L. AND NELSON, W. L. Soil Fertility and Fertilizers. 2nd. Ed. New York. The MacMillan Co. 1966.
25. WARREN, K. S. Ammonia toxicity and pH. Nature. (195): 46-49, 1962.