

Fijación de amonio en un suelo molisol cultivado con caña de azúcar en el valle del río Yaracuy, Venezuela

Danilo López-Hernández^{1*}, Carmen Infante²

¹ Instituto de Zoología y Ecología Tropical, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela (UCV), Caracas, Venezuela.

² Instituto de Ciencias de la Tierra, Postgrado Geoquímica, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela (UCV), Caracas, Venezuela. *Correo electrónico: danilo.lopez@ciens.ucv.ve

RESUMEN

Se analizó la fijación de amonio (NH_4f) en los diferentes horizontes del perfil del suelo (0-200 cm), en un molisol localizado entre Farriar y Palmarejo, estado Yaracuy, Venezuela. Suelo con abundante arcillas 2:1 (montmoriloníticas y muscovíticas) y cultivado con caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.). También se estudiaron los cambios en NH_4f durante el transcurso del ciclo vegetativo (socas) de la plantación. El amonio fijado se determinó por el método clásico de Silva y Bremner. El suelo de la parcela experimental presentó un alto contenido de nitrógeno como amonio fijado. Este representa en el perfil entre 18-57% de $\text{NH}_4\text{f}/\text{N-total}$ y está asociado a la presencia de minerales 2:1. La fijación de amonio ocurrió principalmente en la fracción limosa. Se encontró una alta relación positiva entre el porcentaje de limo y el NH_4f . La asociación del porcentaje de limo más arcilla fue alta, correlación que disminuyó con relación a la capacidad de intercambio catiónico y al contenido de materia orgánica; al contrario, no se encontró correlación con el porcentaje de arcilla. En la plantación, se registraron variaciones de la fracción de amonio fijado con el desarrollo del cultivo; asociadas a la aplicación de fertilizantes y a la intensidad de los procesos microbiológicos del suelo, particularmente la mineralización de N y la amonificación-nitrificación. El amonio fijado en este suelo actúa como un reservorio de nitrógeno, que se libera y se hace disponible en etapas de mayor requerimiento por el cultivo.

Palabras clave: amonificación, arcillas 2:1, montmorilonita, *Saccharum officinarum* L.

Ammonium fixation on soil profile of a mollisol cultivated with sugarcane in the valley of Yaracuy river, Venezuela

ABSTRACT

The ammonium fixation (NH_4f) was analyzed in the different horizons of the soil profile (0-200 cm), in a molisol located between Farriar and Palmarejo, Yaracuy state, Venezuela. Soil with abundant clays 2: 1 (montmorillonitic and muscovitic) and cultivated with sugar cane (*Saccharum officinarum* L.). The changes in NH_4f during the course of the vegetative cycle of the plantation were also studied. The fixed ammonium was determined by Silva and Bremner method. The soil of the experimental plot presented a high content of nitrogen as fixed ammonium. This represents in the profile between 18-57% of $\text{NH}_4\text{f} / \text{N-total}$ and is associated with the presence of minerals 2: 1. Ammonium fixation occurred mainly in the silty fraction. A high positive relationship was found between the percentage of silt and NH_4f . The association of the percentage of silt plus clay was high. This decreased in relation to cation exchange capacity and organic matter content; By the other hand, no correlation was found with the clay percentage. Variations of the ammonium fraction fixed with the development of the crop were registered in the plantation; associated with the fertilizers application and the soil microbiological processes intensity, particularly N mineralization and ammonification-nitrification. The ammonium fixed in this soil acts as a reservoir of nitrogen, which is released and becomes available in stages of greater requirement by the crop.

Key words: ammonification, 2:1 clays, montmorillonite, *Saccharum officinarum*.

Recibido: 20/06/17 Aprobado: 15/12/17

INTRODUCCIÓN

En los agroecosistemas tropicales, subtropicales y templados, el nitrógeno (N), el fósforo (P) y el potasio (K) son los nutrientes más estudiados por su papel esencial en los procesos de crecimiento y producción de los cultivos; entre estos, el cultivo de la caña de azúcar.

Después de una fertilización nitrogenada, las vías por donde puede ser eliminado el N del agroecosistema son múltiples; en primer lugar una proporción sustancial del N en sistemas de producción agrícola es sustraído a través de la cosecha. También pueden ocurrir pérdidas como formas gaseosas: por la quema de los residuos de cosechas; en procesos de denitrificación; o, en las aguas de drenaje como formas solubles inorgánicas de nitratos (NO_3) y amonio (NH_4), según López-Hernández (2013).

El suelo juega un papel regulador en las reacciones que interviene el N, porque allí se producen los procesos de nitrificación, amonificación, mineralización e inmovilización microbiana de N. Si los materiales minerales que conforman el suelo son apropiados, puede ocurrir una acumulación significativa de amonio en los diferentes horizontes del perfil, proceso que se conoce como fijación de amonio. El amonio fijado (NH_4f) se define como la adsorción o absorción de iones amonio por la fracción mineral u orgánica del suelo y estos iones no son fácilmente intercambiables a la solución (Feigenbaum *et al.* 1994; Longeri *et al.* 2001; Nieder *et al.* 2011).

La fijación de amonio es un proceso que ocurre principalmente en suelos donde abundan los filosilicatos secundarios del tipo 2:1 con expansión interlaminar; tal es el caso, de la vermiculita, la illita y la montmorillonita. Por el contrario, las arcillas del tipo 1:1 como la caolinita y la haloisita al no presentar expansión interlaminar por hidratación, no fijan cantidades significativas de amonio; mientras que, las arcillas amorfas (v.g. alofán) no tienen ninguna capacidad para fijarlo (Longeri *et al.* 2001; Nieder *et al.* 2011).

En lo concerniente a los niveles de amonio adsorbido, y su mayor o menor facilidad para ser intercambiado en los sistemas agrícolas se

diferencian los términos amonio fijado en forma nativa y el fijado artificialmente. Se refiere con ello al amonio retenido originalmente durante los procesos de formación del suelo y a una fijación (adsorción) adicional, producto de la aplicación de fertilizantes amoniacales o generada por los procesos internos de mineralización-amonificación, respectivamente (Kudeyarov, 1981; Breitenbeck y Paramasivam, 1995; Nieder *et al.* 2011).

El fenómeno de fijación de amonio es conocido desde el siglo XX (Mc Beth 1917) y fue reportado por Rodríguez (1954) en suelos tropicales cultivados con caña de azúcar. Este proceso es de importancia en la economía del nitrógeno, particularmente en suelos agrícolas. Está restringido a la presencia en el perfil de las arcillas con capacidad para retener el amonio. Como el proceso está asociado con el acomodo interlaminar del ion amonio a las arcillas 2:1, el ion potasio al presentar un radio iónico similar puede competir por los sitios de adsorción y disminuir la capacidad de fijación de amonio (Nommik y Vahtras, 1982; Scherer *et al.* 2014).

El NH_4f en la capa arable de los suelos presenta un amplio rango, lo cual se relaciona con las diferencias en los materiales parentales. También pueden haber grandes diferencias a escala regional (Moyano y Gallardo, 1988; Nieder *et al.* 2011). En suelos con altos contenidos de arcillas 2:1 se han registrado valores de NH_4f de 2000 y 3000 kg de N.ha⁻¹ (Nieder *et al.* 2011). Para los suelos tropicales Stevenson (1982) señala que las cantidades de nitrógeno como amonio fijado pueden variar entre 282 y 1920 mg N.kg⁻¹ de suelo.

Durante décadas, el valle del río Yaracuy, centro de Venezuela, es una zona de producción de caña de azúcar. En esta zona, al igual que otras localidades del país, se ha experimentado una reducción drástica en la producción y peso de tallos del cultivo (Banko, 2007). Tal situación se atribuye, en parte, al abandono de la práctica de fertilización química u orgánica. Por la alta producción de biomasa de este rubro, las demandas de nutrientes, en particular de N y K, en el valle del río Yaracuy son altas. Por tal razón, es

necesario fertilizar con cantidades significativas de N y K y en menor proporción de P. Sequera *et al.* (1984) recomiendan 500 kg.ha⁻¹ de urea, 50 kg.ha⁻¹ de superfosfato triple y 100 kg.ha⁻¹ de cloruro de potasio.

Los suelos en el valle del río Yaracuy, se caracterizan por la presencia de arcillas expansivas tipo 2:1, al igual que en otras zonas del país. A pesar de la existencia en el país de diferentes áreas geográficas con abundancia de arcillas 2:1 (López y Guevara 2012), no se conoce ninguna publicación nacional sobre la fijación de nitrógeno en arcillas de suelos venezolanos. Arcillas de esa naturaleza son capaces de inmovilizar cantidades significativas de N amoniacal, que pueden interferir con la fertilización nitrogenada y potásica de los cultivos.

En esta contribución se aporta información para un molisol ubicado entre los poblados de Farriar y Palmarejo, estado Yaracuy, Venezuela. Con el análisis de la fijación de amonio en los diferentes horizontes del perfil (0-200 cm) del suelo, el cual es caracterizado por presentar abundancia de arcillas 2:1. Igualmente, en ese molisol se analizan los cambios en los contenidos de NH₄^f durante el transcurso de dos ciclos vegetativo (socas y resocas) de una plantación de caña de azúcar. La información obtenida se relacionará con otros procesos ligados al ciclo del N.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación se desarrolló en una parcela experimental cultivada con caña de azúcar (*S. officinarum* L.), ubicada entre los poblados de Farriar y Palmarejo, estado Yaracuy, Venezuela, con coordenadas 10° 28' N y 68° 34' O, situada a 70 m.s.n.m.

El área experimental donde se llevaron a cabo los muestreos correspondió a 4,5 ha. Antes de la preparación del terreno para los experimentos, la caña de azúcar había sido el renglón de cultivo comercial del sitio por décadas.

El clima de la zona se caracteriza como húmedo, con precipitación y temperatura promedio

anual de 1.479 mm y 26,8°C, respectivamente. La época lluviosa se presenta entre los meses de mayo a noviembre y la época seca, desde enero hasta abril (Sequera *et al.* 1984).

El suelo de la parcela experimental pertenece al orden Mollisol, régimen Aquico. Durante este ensayo, tanto la plantilla como la soca y resocas se fertilizaron anualmente con 500 kg.ha⁻¹ de urea, 50 kg ha⁻¹ de superfosfato triple y 100 kg.ha⁻¹ de cloruro de potasio, siguiendo pautas de Sequera *et al.* (1984).

Caracterización del suelo

Se realizó mediante la descripción de una calicata de 0-200 cm de profundidad, en la cual se distinguieron y describieron siete horizontes (Ah₁; Ah₂; Ah₃; C₁; C₂; C₃ y 2C). En cada uno de los horizontes se tomaron muestras, a fin de definir las diferentes características físicas y químicas del perfil que incluyeron: pH agua (1:5,0), carbonatos (Calcímetro de Collins, modificado de acuerdo a Hesse 1971), materia orgánica (MO) y capacidad de intercambio catiónico (CIC) de acuerdo a Hesse (1971). La caracterización mineralógica se realizó por rayos X (Pla Sentís 1983).

Amonio fijado a la fracción fina del suelo

La determinación del amonio fijado al suelo se realizó en dos ensayos. En el primero se analizaron en el suelo del área experimental los valores de NH₄^f a lo largo del perfil (0-200 cm). Se incluyeron los siete horizontes descritos en el Cuadro 1. En este ensayo se tomó una muestra compuesta de cada uno de los horizontes del perfil.

En un segundo ensayo se analizó la variación de los niveles de NH₄^f en diferentes etapas del desarrollo vegetativo del cultivo. Las etapas corresponden a finales del periodo vegetativo de la segunda soca (2S) y a lo largo del crecimiento de la resoca (3S). El muestreo de suelos incluyó la utilización de una muestra compuesta obtenida de 30 submuestras tomadas al azar, en el área experimental, para cada periodo de experimentación.

Para la determinación del amonio fijado se utilizó el procedimiento de Silva y Bremner (1966). Método usado ampliamente, reconocido como el que presenta valores más exactos y reproducibles para el amonio fijado (Moyano y Gallardo, 1988; Paramasivam y Breitenbeck 1994; Longeri *et al.* 2001).

Análisis estadístico

La relación entre los valores de NH_4f y propiedades del suelo fueron establecidas mediante el coeficiente de correlación de Pearson. Para comparar los cambios en los contenidos de NH_4f en las diferentes etapas de desarrollo del cultivo, se efectuaron análisis de varianza de una vía con el programa SP (Buhyoff *et al.* 1982). El nivel de confianza establecido fue de $P>0,01$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características del suelo

En la calicata estudiada se encontraron siete horizontes, cuyo espesor se expresa en el Cuadro 1. Se trata de un suelo calcáreo de pH en agua entre 8,0 y 9,1 y 6,9 a 8,1 en KCl. En ambas determinaciones, los mayores valores de pH (8,8-9,1) se encontraron a la mayor profundidad (64-200 cm). En el horizonte superficial (0-10 cm, horizonte Ah_1), el contenido de carbono (C) y la CIC fueron 1,87 y 53 $cmol.kg^{-1}$, respectivamente; ambos parámetros disminuyen drásticamente

con la profundidad, al igual que el contenido de N total (Cuadro 1).

La textura del suelo es principalmente franco limosa con predominio de arcillas 2:1 (Cuadro 1). El estudio del perfil reveló la presencia de un horizonte molico sobre el horizonte C. Taxonómicamente el suelo pertenece a la familia Typic Haplaquoll, franca fina, isohipertérmica, muscovítica-montmorillonítica-caolinítica.

Amonio fijado en el suelo

El suelo de la parcela experimental presentó un alto contenido de nitrógeno, como amonio fijado ($368-568 \mu g.g^{-1}$) entre 0-42 cm del perfil (Cuadro 2). Esto representa entre 18-57% de NH_4f/N -total en el perfil (0-42 cm). La alta fijación de este N mineral se debe a la presencia de arcillas montmorilloníticas y moscovita (tipo 2:1, Cuadro 1) en los primeros horizontes del suelo. En este caso, la NH_4f se atribuye principalmente a los componentes de los limos en el perfil, porque el contenido de arcillas en el molisol analizado no es alto (Cuadro 2).

Con respecto a la variación de NH_4f con la profundidad, los datos de la literatura muestran resultados contrastantes. Al respecto, algunos autores reportan que los contenidos de amonio fijado aumentan con la profundidad del suelo (Mohammed 1979; Moyano y Gallardo 1988; Ajazi *et al.* 2013); por el contrario, otros autores señalan que disminuyen o que no existe una tendencia clara (Black y Waring 1972). En el perfil

Cuadro 1. Características físico-químicas y mineralógicas del suelo estudiado.

Prof (cm)	Horizontes	pH H_2O	pH KCl	CIC $cmol.kg^{-1}$	C %	N %	CaCO ₃ %	Mineralogía
0-10	Ah_1	8,4	7,4	53	1,87	0,21	0,99	M Mo C
0-25	Ah_2	8,5	7,5	38	1,20	0,14	0,78	Mo M C
25-42	Ah_3	8,3	7,6	41	1,00	0,10	1,57	Mo C M
42-64	C1	8,0	6,9	16	0,60	0,1	1,10	Mo M C
64-105	C2	8,8	7,7	13	0,50	0,05	3,00	Mo
105-164	C3	8,8	7,8	11	0,50	0,03	3,60	Mo M C
164-200	2C	9,1	8,1	7	0,50	0,03	2,80	-----

M=Montmorilonita, Mo=Moscovita, C=Caolinita

Cuadro 2. Composición granulométrica y amonio fijado en el suelo estudiado.

Horizonte	Prof. (cm)	Arena %	Limo %	Arcilla %	Textura	N Fijado mg kg ⁻¹
Ah ₁	0-10	13,5	73,5	13,0	Franco limoso	386
Ah ₂	0-25	11,5	83	5,5	Limoso	560
Ah ₃	25-42	8,5	85	6,5	Limoso	568
C1	2-64	28	65	7,0	Franco limoso	311
C2	64-105	36	60	4,0	Limoso	337
C3	105-164	29	58	13	Franco limoso	275
2C	164-200	52	46	2,0	Franco arenoso	257

estudiado, se encontró una ligera tendencia a disminuir el contenido de NH₄f con la profundidad (P < 0,005); debido, posiblemente, a la disminución de la fracción limosa y un aumento de la arenosa (Cuadro 2).

Se encontró una alta relación positiva (P<0,005) entre el porcentaje de limo y NH₄f, igualmente con el porcentaje de limo más arcilla; asociación que disminuye con relación a la que se obtuvo con la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y al contenido de materia orgánica. Al contrario, no se encontró correlación con el porcentaje de arcilla, mientras que la relación NH₄f y el contenido de arena, como era de esperar fue negativa (Cuadro 3). Estos resultados coinciden con lo reportado por Black y Waring (1972). Los autores señalan que, el amonio fijado en algunos suelos australianos se debe a componentes de la fracción limosa, más que a la arcillosa o capacidad de intercambio catiónico. Opuwaribo y Odu (1978) y Jensen *et al.* (1989) encontraron una alta correlación positiva entre amonio fijado y porcentaje de arcillas más limo, no así, solo con el porcentaje de arcilla. Esto refleja que los componentes del limo fijan amonio en cantidades significativas.

Amonio fijado y desarrollo del cultivo

Los cambios en el contenido de amonio fijado durante ciertas épocas de crecimiento del cultivo se asocian a una incorporación del NH₄f por parte de los cultivos. Esta forma de nitrógeno es suficientemente móvil y puede considerarse como un tipo de reserva de nitrógeno en el suelo (Nomnik y Vahtras 1982). Los cambios estacionales en el contenido de NH₄f en suelos arables de regiones templadas es bien conocido (Kowalenko y Ross 1980; Nieder *et al.* 2011). Mengel y Scherer (1981) investigaron la dinámica de esa fracción de N en un Fluvisol durante la temporada de crecimiento de cultivos. Los autores encontraron que el contenido de NH₄f disminuía en la parte superior del perfil (0-60 cm de profundidad) de febrero a mayo; mientras que, en la capa de suelo más profunda (60-90 cm), se observó un agotamiento en NH₄f de mayo a julio, momento de crecimiento de las raíces en primavera. Al final de la temporada de crecimiento, las arcillas recuperaron los niveles de amonio fijado y se logró casi el mismo contenido que en primavera. Por otra parte, Kowalenko y Cameron (1978) demostraron que en cultivo de cebada, después de la fertilización nitrogenada,

Cuadro 3. Coeficientes de correlación de Pearson entre NH₄f y otras propiedades del suelo.

Propiedad	CIC	MO	Arena %	Limo %	Arcilla %	Arcilla+Limo %
NH ₄ f	0,739**	0,519**	- 0,829**	0,936****	- 0,068 ^{ns}	0,829**

** , *** y **** significativos P < 0,025, 0,01 y 0,005, respectivamente. CIC (capacidad de intercambio catiónico), MO (materia orgánica).

34-60% del fertilizante es fijado de manera inmediata. Posteriormente, durante el periodo de crecimiento, entre 71 y 96% es liberado y puede estar disponible al cultivo. Mohammed (1979) en suelos libaneses encontró que aproximadamente un 38% del amonio fijado total (nativo más artificial) se hace disponible para el crecimiento de cultivos de cebada. Concluyó que el 100% del amonio fijado artificialmente es liberado y que solo un 3,4% del nativo se hace asequible para el cultivo. Wehrmann y Eschenhoff (1986) en cultivos de nabos, concluyen que el amonio fijado nativo no es incorporado por las plantas; por el contrario, el amonio fijado de la fertilización fue absorbido y casi completamente extraído del suelo que se encontraba en contacto con las raíces.

Para el caso de la plantación de caña de azúcar, se registraron variaciones notables de la fracción de amonio fijado durante el desarrollo del cultivo. Con aumentos y reducciones significativas asociadas a la aplicación de fertilizantes y a la intensidad de los procesos microbiológicos del suelo (Cuadro 4). Se encontró una disminución significativa ($P < 0,01$) en el contenido de amonio fijado, entre el final de la segunda soca (2S) y el comienzo de 3S. Este período se corresponde cuando la caña ha sido fertilizada y muestra una significativa biomasa y la época en que recién comienza el rebrote de la soca y aun no se ha fertilizado (Cuadro 4). Entre el inicio (30 días) de la tercera soca y finales de 3S se registró un aumento ($P < 0,01$) que continúa hasta el máximo de biomasa o época de cosecha. Para explicar estas diferencias, es necesario separar las formas de amonio fijado que se podrían encontrar

en el agrosistema. El contenido de NH_4^+ y su variación en el desarrollo del cultivo, probablemente se debe a que los limos y arcillas fijan y liberan amonio producto de la fertilización y/o mineralización; de esta manera, una gran proporción de N-amonio “fijado artificialmente” es liberado y puede seguir los diferentes pasos del ciclo del nitrógeno: nitrificación, lixiviación, volatilización e inmovilización (absorción) por plantas y microorganismos.

La disminución observada entre 2S y el comienzo de 3S, cuando aún no se había fertilizado corresponde a una movilización del amonio fijado hasta la solución del suelo (Amonio fijado ↔ Amonio intercambiable ↔ Amonio solución). Parte del amonio fijado artificialmente y liberado al comienzo del desarrollo del cultivo (30 días en la tercera soca) puede ser utilizado por el cultivo o ser nitrificado. Posteriormente, se observó un incremento en los valores de NH_4^+ entre el comienzo de la 3S (30 días) y finales de la misma (309 días) que corresponden al amonio fijado “artificialmente” por vía de la fertilización y mineralización (Cuadro 4).

Se presume que parte del nitrógeno del fertilizante se fija a la fracción fina de estos suelos, información previamente publicada por López-Hernández *et al.* (2005) y López-Hernández e Infante (2016). Esto explica del por qué, las pérdidas por lixiviación en este agrosistema son tan bajas ($5,31 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$); así solo aproximadamente un 2,3% del fertilizante aplicado se pierde por lixiviación, principalmente como nitratos (López-Hernández *et al.* 2005).

Cuadro 4. Cambios en el contenido de amonio fijado durante el crecimiento del cultivo.

Edad del cultivo (días) en las diferentes socas	Etapas del desarrollo vegetativo y manejo agronómico	Amonio Fijado Promedio ± desviación standard ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
248 días de la Segunda Soca	Cercano al máximo de biomasa y fertilizado	544 ± 7,5 c
30 días de la Tercera Soca	Comienzo del desarrollo vegetativo, sin fertilizar	391 ± 11,7 a
147 días de la Tercera Soca	Mediado del ciclo vegetativo, fertilizado	474 ± 43,0 b
309 días de la Tercera Soca	Máximo de biomasa, antes de quema, fertilizado	560 ± 20,6 c

Promedios seguidos de letras diferentes, difieren significativamente entre sí.

El proceso de nitrificación fue intenso en el molisol estudiado ($0,95 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{día}^{-1}$). La intensa nitrificación está en concordancia con una alta tasa de mineralización ($0,87 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{día}^{-1}$). Esto corresponde a una mineralización anual acumulada de $318 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (López-Hernández e Infante 2016), valor superior al registrado en otros sistemas agrícolas (Sánchez 1990).

La alta nitrificación puede ser consecuencia de la baja relación C:N (7:10) y de la fertilización con urea. El proceso de nitrificación se favorece en suelos de baja relación C/N (<18) (Adams y Attiwill 1986). Así mismo, la fertilización con urea genera una mayor producción de nitratos (Mariano *et al.* 2013). Nommik (1981) señala que el proceso de nitrificación conlleva a una remoción del amonio cambiante en los suelos, lo que puede conducir a una liberación del amonio fijado. Se reporta que la presencia de N-serve (un inhibidor de la nitrificación) reduce la liberación del amonio recién fijado. Esto sugiere que los organismos nitrificantes son intermediarios en hacer la fracción de amonio fijado disponible a los cultivos (Kowalenko y Cameron 1978; Juma y Paul 1983).

La liberación del amonio fijado a las arcillas es de importancia especial, ya que puede contribuir a suministrar parte del N necesario al cultivo. En los primeros 30 días de crecimiento del cultivo, el contenido de N total en la plantación estudiada fue alrededor de $20 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; valor similar al contenido de N en las malezas reportado por López-Hernández *et al.* (2005). Eso indica, que para el momento, el subsistema planta había incorporado aproximadamente $40 \text{ kg}\cdot\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}$. Tomando en cuenta que para esta fecha aún no se había aplicado el fertilizante (Cuadro 4), y la cantidad de nitrógeno disponible proveniente de la mineralización neta solo alcanzaba $22,4 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (López-Hernández *et al.* 2005), se puede estimar un déficit en el requerimiento de nitrógeno, para esa etapa, de $17,6 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. El déficit puede ser cubierto por la liberación de amonio fijado en el componente arcilloso.

Black y Waring (1972) encontraron que cuando el suelo se cultiva intensa y consecutivamente, todo el amonio fijado “artificialmente” puede ser

disponible a las plantas. Bajo esas circunstancias se considera que el amonio fijado en suelos actúa como un reservorio de nitrógeno; el cual se libera y, por ende, se hace disponible en las etapas de mayor requerimiento por el cultivo.

CONCLUSIONES

El suelo de la parcela experimental, presentó un alto contenido de nitrógeno como amonio fijado. Esto representó entre 18-57% de amonio fijado respecto al N-total en el perfil. La alta fijación de este N mineral se debe a la presencia de minerales 2:1 (montmorilonitas y moscovitas).

Se encontró una alta relación positiva ($P < 0,005$) entre el porcentaje de limo y el NH_4f . También, la asociación entre el NH_4f y el porcentaje de limo más arcilla fue alta, correlación que disminuyó de acuerdo a la obtenida para la CIC y el contenido de MO; al contrario, no se encontró correlación con el porcentaje de arcilla, mientras que la relación NH_4f y el contenido de arena, como es de esperar, fue negativa.

En la plantación de caña de azúcar se registraron variaciones entre la fracción de amonio fijado durante el desarrollo del cultivo; asociadas a la aplicación de fertilizantes y a la intensidad de los procesos microbiológicos del suelo. Se encontró una disminución significativa del NH_4f entre el final de la 2S y comienzos de la 3S, cuando la plantación usó el amonio fijado “artificialmente”. Por el contrario, entre inicios (30 días) y finales de la tercera soca se registró un aumento del NH_4f relacionado con las prácticas de fertilización y la mineralización del N-orgánico.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración técnica de F. Tovar. Este trabajo recibió soporte financiero parcial de CDCH-UCV y CENAZUCA. Un especial agradecimiento al Dr. J.L. Berroterán por la caracterización taxonómica del suelo de la parcela experimental y a dos revisores anónimos del manuscrito por sus acertados y oportunos comentarios.

LITERATURA CITADA

- Adams, MA; Attiwill, PM. 1986. Nutrient cycling and nitrogen mineralization in Eucalypt forests of southeastern Australia. II. Indices of nitrogen mineralization. *Plant and Soil* 92(3):341-362.
- Ajazi, A; Miho, L; Bani, A; Maçi, A. 2013. Effect of potassium on fixation of ammonium by clay minerals in different soil layers. *The Albanian Journal of Agricultural Sciences* 12(4):675-681.
- Banko, C. 2007. La industria azucarera en la región Centro Occidental. *Mañongo* 29:283-304.
- Bernhard, A. 2010. *The Nitrogen Cycle: Processes, Players, and Human Impact*. Nature Education Knowledge 3(10):25.
- Black, AS; Waring, SA. 1972. Ammonium fixation and availability in some cereal producing soils of Queensland. *Australian Journal of Soil Research* 10:197-207.
- Breitenbeck, GA; Paramasivam, S. 1995. Availability of ¹⁵N-labeled non-exchangeable ammonium to soil microorganisms. *Soil Science* 159:301-310.
- Buhyoff, JF; Rauscher, HM; Hull, RB; Killeen, K; Kirk, RC. 1982. *Statistical processing system version 4.2 for Apple II⁺. User's Manual*. U.S. Dept. of Agriculture. Forest Service. 115 pp.
- Feigenbaum, S; Hadas, A; Sofer, M; Molina, JA. 1994. Clay-fixed labeled ammonium as a source of available nitrogen. *Soil Science Society American Journal*. 58:980-985.
- Hesse, PR. 1971. *Chemical Analysis*. John Murray Publishers Ltd. 1st Edition. Pp. 520
- Jensen, ES; Christensen, BT; Sorensen, LH. 1989. Mineral-fixed ammonium in clay- and silt-size fractions of soils incubated with ¹⁵N-ammonium sulphate for five years. *Biology and Fertility of Soils* 8:298-302.
- Juma, NG; Paul, EA. 1983. Effect of a nitrification inhibitor on N immobilization and release of ¹⁵N from nonexchangeable ammonium and microbial biomass. *Canadian Journal Soil Science* 63(2):167-175.
- Kowalenko, CG; Cameron, DR. 1978. Nitrogen transformations in an incubated soil as affected by combinations of moisture and temperature and adsorption-fixation of ammonium. *Canadian Journal Soil Science* 56:63-70.
- Kowalenko, CG; Ross, GJ. 1980. Studies on dynamics of recently clay- fixed NH₄⁺ using ¹⁵N. *Canadian Journal Soil Science* 60:61-70.
- Kuderayov, VN. 1981. Mobility of fixed ammonium in soil. In: Clark P. E. and T. Rosswall (Eds). *Terrestrial Nitrogen Cycles*. Ecological Bulletins N° 33. pp. 281-290.
- López, C; Guevara, E. 2012. *Determinación y evaluación de las arcillas expansivas y dispersivas en tres localidades al norte de Venezuela, estados Anzoátegui, Falcón y Miranda*. (Tesis de pregrado). Ingeniería Geológica. Universidad Central de Venezuela. 120 p.
- López-Hernández, D. 2013. *N biogeochemistry and cycling in two well drained savannas: a comparison between the Orinoco Basin (Llanos-Venezuela) and Ivory Coast (Western-Africa)*. *Chemistry & Ecology* 29(3):280-295. DOI:10.1080/02757540.2012.744830.
- López-Hernández, D; Infante, C. 2016. *N Cycle in a Venezuelan Sugarcane Plantation. How Biogeochemical Processes Contribute to Supply N Needs*. *ST Agri. Science* 1:1003.
- López-Hernández, D; Infante, C; Medina, E. 2005. Balance de elementos en un agroecosistema de caña de azúcar: I. Balance de nitrógeno. *Tropicultura* 23:212-219.
- Longeri L; Vidal, I; Fernández, M. 2001. Fijación de amonio en seis suelos de la VIII Región de Chile. *Agricultura Técnica* 61 (2):180-191.
- Mariano, E; Ocheuze, PC; Leite, JM; Vieira, MX; Otto, R; Coutinho, JF. 2013. Incubation

- methods for assessing mineralizable nitrogen in soils under sugarcane *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 37:450-461.
- Mc Beth, IG. 1917. Fixation of ammonium in soils. *Journal of Agricultural Research* 9:141-155
- Mengel, K; Scherer, HW.1981. Release of non-exchangeable (fixed) soil ammonium under field conditions during the growing season. *Soil Science* 131:226-232.
- Mohammed, ICH. 1979. Fixed ammonium in Lybian soils and its availability to barley seedlings. *Plant Soil* 53:185-196.
- Moyano, A; Gallardo, JF. 1988. Fixed ammonium determination in some clay soils. *Communications in soil Science and Plant Analysis* 19:225-238.
- Nieder, R; Benbi. DK, Scherer, HW. 2011. Fixation and defixation of ammonium in soils: a review. *Biology and Fertility of Soils* 47: 1-14.
- Nommik, H. 1981. Fixation and biological availability of ammonium on soil clay minerals. In: Clark P. E. and T. Rosswall (Eds). *Terrestrial Nitrogen Cycles*. *Ecological Bulletins* N° 33. pp. 273-279.
- Nommik H; Vahtras, K. 1982. Retention and Fixation of Ammonium and Ammonia in Soils. *Nitrogen in Agricultural Soils-Agronomy Monograph* no. 22. ASA-CSSA-SSSA, Madison, USA. pp. 123-171.
- Opuwaribo, E; Odu, C.T.I. 1978. Ammonium fixation in Nigerian soils: 4. The effects of time, potassium, and wet and dry cycles on ammonium fixation. *Soil Science* 125 (3):137-145.
- Paramasivam, S; Breitenbeck, GA. 1994. Distribution of nitrogen in soils of the Southern Mississippi River alluvial plain. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 25:247-267.
- Pla Sentís I. 1983. Metodología para la caracterización física con fines de diagnóstico de problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales. Alcance. *Revista de la Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela, Maracay*. 32: 91.
- Rodríguez, G. 1954. Fixed ammonium in tropical soils. *Journal Soil Science* 5:264-274.
- Sánchez, CA. 1990. Soil-testing and fertilizer recommendations for crop production on organic soils in Florida. *University of Florida Technical Bulletin*. 376 p.
- Scherer, HW; Feils, E; Beuters, E. 2014. Ammonium fixation and release by clay minerals as influenced by potassium. *Plant Soil Environmental* 60(7):325-331.
- Sequera, PE; López-Hernández, D; Medina, E. 1984. La producción de caña de azúcar en el Valle del Río Yaracuy. Caracas, EDICANPA. 135 p.
- Silva, JA; Bremner, JM. 1966. Determination and isotope-ratio analysis of different forms of nitrogen in soils. 5. Fixed ammonium. *Soils Science Society of America. Proceedings*. 30:587-594.
- Stevenson, FJ. 1982. Organic forms of soil nitrogen. In: *Humus Chemistry. Genesis, composition, reactions*. John Wiley & Sons. USA. pp. 55-81.
- Wehrmann, J; Eschenhoff, HCZ. 1986. Distribution of nitrate, exchangeable and non-exchangeable ammonium in soil-root interface. *Plant and Soil* 91:421-424.