

EVALUACIÓN DE LA MOVILIDAD DEL AZUFRE EN UN SUELO VITRIC HAPLUSTAND

EVALUATION OF SULFUR MOBILITY IN SOIL VITRIC HAPLUSTAND

Héctor Adrian Bacca¹, Juan Andrés Narvaez¹, Alberto Unigarro S.²

Fecha de recepción: 16 de mayo de 2010 Fecha de aceptación: 9 de febrero de 2011

RESUMEN

En el altiplano de Pasto, existen suelos derivados de cenizas volcánicas en los que se han intensificado las actividades agrícolas ocasionando degradación y pérdida de nutrientes que provienen de la materia orgánica del suelo. En condiciones de laboratorio, se evaluó la aplicación de azufre elemental, sulfato de calcio dihidratado, sulfato de magnesio y sulfato de amonio en dosis de 0, 30, 60 y 120 kg.ha⁻¹, sobre la movilidad del ión SO₄⁼ y el cambio en el pH. Se tomaron 128 muestras de suelo a 30 cm de profundidad con cilindros de PVC las que se incubaron por 60 y 120 días. La adición de azufre elemental, no influyó sobre la movilidad del azufre y el pH. A los 60 días de incubación la disponibilidad del azufre dependió de la dosis adicionada; a los 120 días la distribución del ión SO₄²⁻ obedeció a la interacción fuente x dosis x profundidad de evaluación. Cuando se aplicó sulfato de amonio se presentó diferencias en la disponibilidad de azufre en profundidad. Con la utilización de sulfato de calcio y sulfato de magnesio su disponibilidad se relacionó con la dosis de azufre. El pH a los 60 y 120 días de incubación dependió de la interacción fuente x dosis x profundidad de evaluación. A los 60 días de incubación, el pH cambió en función de la profundidad cuando se aplicó sulfato de calcio y obedeció a la dosis de azufre aplicada y profundidad de evaluación con sulfato de amonio y sulfato de magnesio. A los 120 días, el pH cambió con la dosis para el sulfato de calcio y sulfato de magnesio y dependió de la dosis y la profundidad de evaluación con sulfato de amonio.

Palabras clave: Ceniza volcánica, pH, sulfatos.

¹ Egresados de Ingeniería Agronómica. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Nariño.
E-mail: adrianbacca86@hotmail.com; juandres56@hotmail.com

² Ingeniero Agrónomo. M.Sc. Productor, E-mail: unilab61@gmail.com

ABSTRACT

In Pasto altiplano, there are grounds derived from volcanic ash in which agricultural activities have been intensified causing degradation and loss of nutrients that originate from the organic material of the ground. In laboratory conditions, the application of elemental sulfur, dehydrated calcium sulfate, magnesium sulfate, and ammonia sulfate was tested in quantities of 0, 30, 60 and 120 kg.ha⁻¹ over the mobility of the SO₄⁻ ion and the change in the pH value. 128 samples of earth were taken from a depth of 30cm with PVC cylinders, which were incubated for 60 and 120 days. Elemental sulfur addition did not act on sulfur mobility and pH. After 60 days of incubation, sulfur availability depended upon the quantity added; 120 days later, SO₄²⁻ ion distribution responded to the interaction source x quantity x evaluation depth. Ammonia sulfate being added, some differences were shown in sulfur availability in depth. With the utilization of calcium and magnesium sulfate, its availability was related to the sulfur quantity. After 60 and 120 days of incubation, pH depended on the interaction source x quantity x evaluation depth. 60 days after, pH changed in terms of depth when calcium sulfate was added and it responded to the amount of sulfur added and the evaluation depth with ammonia and magnesium sulfate. 120 days later, pH changed with the calcium and magnesium sulfate quantity and it depended on the amount and evaluation depth with ammonia sulfate.

Key words: Volcanic ash, pH, sulfates.

INTRODUCCIÓN

En la zona Andina del departamento de Nariño, más del 80% de los suelos son derivados de cenizas volcánicas, caracterizados por presentar una reacción ácida y presencia de altos contenidos de materia orgánica, los cuales afectan la disponibilidad de elementos minerales esenciales para el desarrollo de cultivos (IGAC, 2004, Brady, 1990; Bohn *et al.*, 1993; Tan, 1993; Salgado, 1996).

El azufre (S) es considerado un elemento esencial para la nutrición de las plantas (Epstein y Bloom, 2004). La concentración de S en los tejidos es similar a la del fósforo, situación que lo ubica como el cuarto elemento después del nitrógeno, el fósforo y el potasio (González, 2003, Guerrero, 2002). Es requerido para la síntesis de cistina, cisteína y metionina; formación de la clorofila;

activación de ciertas enzimas proteolíticas; síntesis de algunas vitaminas (biotina, tiamina), glutatión y coenzima A; formación de glucósidos, formación de ciertas uniones disulfídicas tales como el sulfhidrilo (grupo SH), que además de generar turgencia en los aceites también imparten resistencia a la sequía y al frío; formación de ferredoxina y de proteínas que contienen hierro que actúan como transportadores de electrones en el proceso fotosintético, y que tienen que ver con la fijación simbiótica de nitrógeno y activación de la sulfurilaza-ATP (Barrera, 2001).

En el suelo existen básicamente dos formas de este elemento; la orgánica, que representa más del 90% de la reserva total existente (Janzen y Ellert, 2001), aunque su velocidad de transformación en formas aprovechables no supera el 2% al año (Saggar y Bolan, 2003); y la inorgánica, como sulfatos (SO₄²⁻), los sulfuros (S²⁻), el azufre

elemental (S^0), el sulfito (SO_3^{2-}), el tiosulfato ($S_2O_3^{2-}$) y el tetrionato ($S_4O_6^{2-}$). (Sampaio *et al.*, 2000), que pueden hallarse en los suelos combinadas con calcio, magnesio, potasio, sodio y amonio (Burbano, 2001).

La mayor parte de las fuentes azufradas utilizadas en la agricultura presentan el S como SO_4^{2-} y varían desde muy poco solubles (yeso agrícola) a muy solubles (sulfato de amonio, sulfato de magnesio). Como fuentes insolubles sólidas, la más importante es el S^0 (Oliverio *et al.*, 2001); cuya solubilidad y movilidad en el suelo, dependen de las condiciones edáficas o del ión acompañante. Al igual que otros minerales utilizados en la agricultura pueden variar considerablemente en su pureza y contenido de S. Más de 60 productos fertilizantes utilizados en la agricultura contienen azufre. Esta cifra incluye aquellos derivados de síntesis industrial, los subproductos y los de origen natural; sin embargo, casi siempre estos productos son utilizados pensando en los nutrientes acompañantes y no tanto en el azufre como elemento esencial (Tibaquirá, 2000).

El S al ser aplicado al suelo está sujeto a oxidación, a través de la cual se transforma a sulfato en condiciones aeróbicas (Miyamoto, 2000). En el caso del S y a diferencia de lo que ocurre con el N, es posible diferenciar dos tipos o mecanismos de mineralización: mineralización biológica y mineralización bioquímica. La mineralización biológica de S está determinada por la demanda microbiana de C para proveer energía para su crecimiento, liberando SO_4^{2-} como subproducto de la oxidación del C a CO_2 . La transformación se realiza principalmente a través de microorganismos, por lo cual los factores que afectan la actividad microbiológica (temperatura, humedad, pH y disponibilidad de sustrato) también influyen en los procesos

de mineralización, inmovilización, oxidación y reducción. La mineralización bioquímica, en cambio, implica la liberación de SO_4^{2-} desde el pool de sulfato-ésteres a través de una hidrólisis enzimática (Anderson *et al.*, 2006, Haneklaus *et al.*, 2007).

Los microorganismos que intervienen en el proceso de oxidación del azufre son principalmente del género *Thiobacillus*, siendo *Thiobacillus thiooxidans* la especie más importante (Chapman, 2000 y Miyamoto, 2000). Sin embargo, otros autores señalan que bacterias heterotróficas y autotróficas facultativas del suelo, pueden ser de mayor relevancia, debido a que se encuentran en mayor cantidad que el género *Thiobacillus*. También, sugieren que el segundo género es importante en la oxidación del azufre sólo a pH ácido, y que las heterotróficas son las principales en suelos neutros a alcalinos (Miyamoto, 2000).

Existen además de los microorganismos del suelo, factores físicos que influyen en la tasa de oxidación del azufre. Los más importantes son: humedad, temperatura, tipo de suelo y tamaño de la partícula de azufre (Deng y Dick, 1990). La temperatura que debe tener el suelo para la oxidación del azufre se encuentra en el rango de 4 a 45°C, con un rango óptimo entre los 25 y 40°C para la mayoría de ellos (Deng y Dick, 1990; Miyamoto, 1998). Se ha demostrado que con potenciales de agua cercanos a capacidad de campo, la oxidación del azufre procede más rápidamente (Miyamoto, 1998), con un menor contenido de agua, la actividad microbiana se ve limitada y se reduce la accesibilidad de las partículas de azufre, que es altamente hidrofóbico. Por el contrario, con un contenido alto de humedad, la oxidación está limitada posiblemente por una reducción de la aireación del suelo. Por otra parte, la tasa de oxidación del azufre

mineral se incrementa con una disminución del diámetro de la partícula, siendo mayor cuando éstas presentan un tamaño menor a 0,14 mm. Además, la oxidación del azufre es una reacción exclusivamente superficial y las moléculas del exterior de las partículas están expuestas a una mayor actividad química y biológica. Consecuentemente, la cantidad de sulfato producido por unidad de tiempo es una función total del área superficial del azufre y no de su masa.

Las investigaciones realizadas con S en suelos de Nariño, corresponden al estudio de la fracción tanto orgánica como inorgánica y respuesta de los cultivos a su aplicación; por tanto, el objetivo de esta investigación fue evaluar en un suelo derivado de cenizas volcánicas del altiplano de Pasto, la aplicación de sulfato de amonio, sulfato de magnesio, sulfato de calcio y azufre elemental, en dosis de 0, 30, 60 y 120 kg.ha⁻¹ de azufre, sobre la movilidad de la fracción disponible del azufre (SO₄²⁻) y su influencia sobre el pH del suelo, la cual puede afectar indirectamente el crecimiento de las plantas a través de su efecto en la disponibilidad de nutrientes para los cultivos.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en la Universidad de Nariño, bajo condiciones de laboratorio. Las muestras de suelo fueron tomadas en la vereda Cruz de Amarillo, municipio de Pasto (1° 7' 51.17" norte y 77° 17' 47.29" oeste) (Corponariño, 2004). Los suelos según el IGAC (2004) se clasifican como vitric haplustand, desarrollados a partir de cenizas volcánicas, muy profundos, bien drenados, presentan reacción positiva al fluoruro de sodio (NaF), textura franca a franco-arenosa muy friable; pH entre 4.0 y 5.7, con tendencia a aumentar con la profundidad;

alto contenido de carbono orgánico, alta capacidad de intercambio de cationes y de saturación del complejo de cambio.

Para tomar muestras "inalteradas", se enterraron, 128 tubos de PVC de 3 pulgadas de diámetro y 30cm de largo. En el laboratorio, inicialmente se aplicó agua destilada sobre el suelo contenido en los cilindros, se dejó reposar por 48 horas y se tomó el peso individual del cilindro con el suelo, considerando éste a capacidad de campo (Insuasty, *et al.*, 2008). Para evaluar la movilidad del S y el cambio que se puede generar en el pH del suelo, se aplicaron cuatro fuentes de S en cuatro dosis sobre la superficie del suelo contenido en los cilindros y luego se incorporó en forma superficial. Dos veces por semana se pesó cada tubo y se llevó con agua destilada a capacidad de campo.

Se utilizaron como fuentes de azufre: sulfato de amonio (SAM, 24% S), sulfato de calcio dihidratado (yeso, 18% S), sulfato de magnesio (Kieserita, 23% S) y azufre elemental (S° 99% S) aplicados en dosis de: 0 - 30 - 60 y 120 kg.ha⁻¹.

A los 60 días de incubación, se evaluaron 64 cilindros; se sacó el suelo contenido en los mismos y se dividió en tres secciones, (superior 0 - 10 cm; medio 10 - 20 cm e inferior 20 - 30 cm) y se determinó el azufre disponible y el pH en cada una de las porciones (Unigarro y Carreño, 2005). A los 120 días se evaluaron los restantes 64 cilindros realizando el mismo procedimiento.

Para la evaluación estadística se realizó un An-deva. Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con arreglo en parcelas sub-divididas, donde los factores evaluados fueron: cuatro fuentes de S, cuatro dosis de aplicación y tres secciones, con cuatro repeticiones.

Para aquellas variables que presentaron diferencias estadísticas significativas en la interacción, éstas se evaluaron mediante un diseño de bloques completos al azar en arreglo de parcelas divididas. Para aquellas variables que presentaron diferencias estadísticas significativas se realizó la prueba de comparación de promedios de Tukey.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se presentan los valores de los cuadrados medios y su grado de significancia. Se observan diferencias estadísticas altamente significativas ($P < 0,01$) en el factor dosis para la primera evaluación del S-disponible; y en la interacción fuente x dosis x profundidad para el pH. Para la segunda evaluación (120 días de

incubación), el S - disponible y el pH se afectaron en forma altamente significativa ($P < 0,01$) por la interacción de los tres factores estudiados (fuente, dosis y profundidad).

Azufre disponible. A los 60 días de incubación, independiente de la fuente o la profundidad de evaluación, se encontraron efectos significativos ($P < 0,01$) de las dosis de azufre aplicadas sobre la cantidad de azufre disponible (SO_4^{2-}) (Tabla 1).

Según la prueba de comparación de promedios de Tukey, la mayor disponibilidad de azufre ($30,23 \text{ mg kg}^{-1}$) se obtuvo cuando se aplicó 120 kg ha^{-1} de S, la cual presentó diferencias estadísticas significativas con el contenido de S-disponible obtenido cuando se aplicaron 0, 30 y 60 kg ha^{-1} de S con contenidos promedios que fluctuaron entre $13,41$ y $22,99 \text{ mg kg}^{-1}$ de SO_4^{2-} (Gráfica 1).

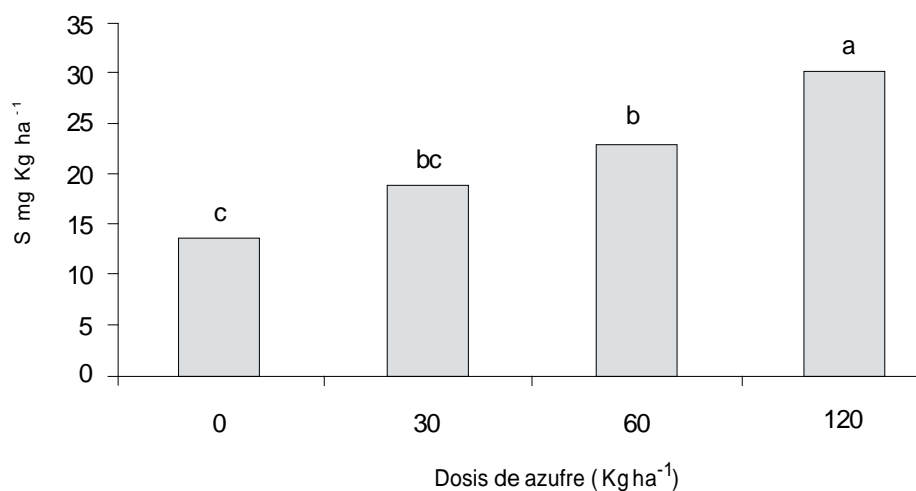
Tabla 1. Análisis de varianza para el contenido de S - disponible (SO_4^{2-}) y el pH del suelo obtenido por la aplicación de cuatro fuentes y cuatro dosis de azufre, evaluadas a tres profundidades a los 60 y 120 días después de su incubación

F de V	GL	Primera evaluación		Segunda evaluación		Significancia	
		Azufre	pH	Azufre	pH		
		CM				5%	1%
Bloque	3	94,24 ^{ns}	0,0290*	445,17 ^{ns}	0,00174 ^{ns}	3,86	6,99
Fuentes	3	322,27 ^{ns}	0,0200*	3785,96**	0,10688**	3,86	3,99
Residual (a)	9	216,32	0,0047	141,75	0,004143		
Dosis	3	2403,39**	0,055**	1799,91**	0,181180**	2,85	4,39
Dosis x Fuente	9	186,87 ^{ns}	0,021*	505,93**	0,05655*	2,18	2,96
Residual (b)	36	123,66	0,0081	121,15	0,00752		
Profundidad	2	4453,35 ^{ns}	0,091**	617,68**	0,02255**	3,10	4,86
Profundidad x Fuente	6	294,77 ^{ns}	0,037**	54,08 ^{ns}	0,029010**	2,15	3,02
Profundidad x Dosis	6	1331,26 ^{ns}	0,025**	265,43**	0,06456**	2,15	3,02
Prof x Dosis x Fuente	18	898,15 ^{ns}	0,044**	479,34**	0,071417**	1,75	2,12
Residual (c)	96	8597,88	0,00035	31,32	0,001234		
TOTAL	191						

NS No significativo

*Significativo ** Altamente significativo

Gráfica 1. Evaluación del S- disponible (SO_4^{2-}) obtenido a los 60 días de incubación con aplicación de cuatro fuentes y cuatro dosis de azufre, evaluado a tres profundidades. Prueba de Tukey



Promedios con la misma letra no son significativos

Esto indicaría que a los 60 días de incubación la menor solubilidad en agua del sulfato de calcio dihidratado y el azufre elemental, respecto de los fertilizantes químicos granulados, no limitaría la liberación de sulfatos al medio edáfico y por lo tanto todas las fuentes evaluadas, desde una perspectiva agronómica, tendrían similar capacidad para abastecer con sulfatos al cultivo, o también podría la mineralización del S - orgánico inicialmente suministrar algo de S particularmente cuando los suelos tienen un alto contenido de materia orgánica, como es el caso de los suelos en estudio; de acuerdo con Tisdale y otros (1993), la mineralización de S a partir de la materia orgánica varía anualmente entre 4,4 a 14,3 kg ha^{-1} ; aunque en algunos suelos derivados de cenizas volcánicas que contienen grandes cantidades de materia orgánica, el suministro de S es muy bajo, en razón del carácter estable de la materia orgánica (Burbano, 2001).

Al respecto, Burbano (1984), menciona que al adelantar una prueba de incubación con suelos de la región Pacífica de Nicaragua, dentro de la

posibilidad mineralización o inmovilización predomina ampliamente este último proceso. Se encontró que en general la cuarta semana es un punto crítico en el proceso de incubación, a partir del cual decae fuertemente la liberación de CO_2 y se registra un incremento en la producción de SO_4^{2-} . Se puede asumir entonces, que la adición de fertilizantes provocaría la inmovilización del S- SO_4^{2-} del suelo en el primer mes de aplicación, mientras que a partir de este período existiría la posibilidad de que mejore la disponibilidad del azufre.

Para la segunda evaluación (120 días de incubación), se encontraron efectos significativos ($P < 0,01$) de las dosis sobre la concentración de azufre - disponible cuando se utilizó sulfato de calcio dihidratado y sulfato de magnesio. Con la aplicación de sulfato de amonio (SAM) la disponibilidad de S presentó diferencias estadísticas ($P < 0,05$) en la interacción dosis por profundidad y cuando se utilizó S -elemental éste no tuvo incidencia sobre la disponibilidad del azufre en el suelo (Tabla 2).

Tabla 2. Análisis de varianza para el contenido de S - disponible (SO_4^{2-}) del suelo obtenido al aplicar diferentes fuentes y dosis de azufre, evaluado a tres profundidades a los 120 días de incubación

F de V	GL	CM				Significancia	
		$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	S	MgSO_4	5%	1%
Bloques	3	213,12 ^{ns}	99,673 ^{ns}	245,14 ^{ns}	312,49*	3,86	6,99
Dosis	3	1428,72**	431,41 ^{ns}	24,16 ^{ns}	1433,41**	3,86	6,99
Residual (a)	9	134,8	197,43	85,04	67,33		
Profundidad	2	350,04 ^{ns}	211,355**	9,17 ^{ns}	193,63 ^{ns}	3,40	5,61
Dosis x Profundidad	6	317,24 ^{ns}	148,31*	105,38 ^{ns}	56,04 ^{ns}	2,51	3,67
Residual (b)	24	133,33	30,098	46,18	185,28		
TOTAL	47	254,09	115,427	70,89	234,34		

NS No significativo * Significativo ** Altamente significativo

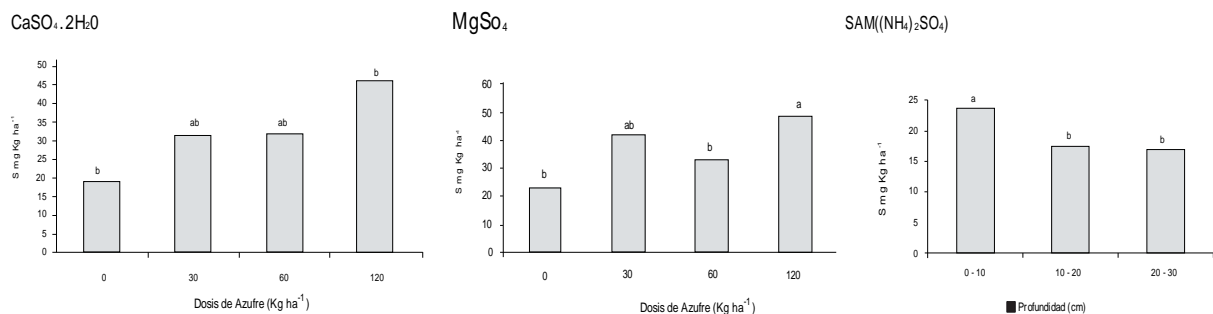
Cuando se aplicó la dosis más alta de sulfato de calcio dihidratado (120 kg S ha^{-1}), también se obtuvo la mayor concentración de S-disponible ($45,94 \text{ mg kg}^{-1}$), la cual únicamente presentó diferencias estadísticas significativas con la concentración de S-disponible encontrada en el testigo (sin fertilización) con $19,24 \text{ mg kg}^{-1}$ (Gráfica 2).

Con la aplicación de sulfato de magnesio, se presentó una respuesta errática, la mayor concentración de S-disponible ($48,73 \text{ mg kg}^{-1}$), se obtuvo

cuando se aplicó 120 kg S ha^{-1} , la cual no presentó diferencias estadísticas significativas con el S-disponible encontrado cuando se adicionó 30 kg S ha^{-1} con $31,59 \text{ mg kg}^{-1}$, y presentó diferencias estadísticas con la concentración de S-disponible cuando se aplicó en dosis de 0 y 60 kg S ha^{-1} (Gráfica 2).

El comportamiento obtenido puede estar relacionado con la mayor solubilidad que presenta el sulfato de magnesio en relación con el sulfato de calcio (Janzen y Bettany, 1986), por lo que el

Gráfica 2. Evaluación del S - disponible (SO_4^{2-}) (120 días de incubación) obtenido al aplicar diferentes fuentes y dosis de azufre, evaluado a tres profundidades a los 120 días de incubación. Prueba de Tukey



Promedios con la misma letra no son significativos

sulfato de calcio al ser menos soluble y, por tanto, mantener una acción más lenta y prolongada en el tiempo, arrojó valores más altos de S-disponible con el incremento de la dosis aplicada, mientras que el sulfato de magnesio, por ser más soluble, fue probablemente perdido por inmovilización microbiana o por lixiviación.

Al aplicar sulfato de amonio (SAM), la mayor concentración de S-disponible se encontró en los primeros 0 - 10 cm de profundidad de evaluación con $23,65 \text{ mg kg}^{-1}$, el cual presentó diferencias estadísticas significativas con la concentración de S-disponible obtenida de 10-20 y 20-30 cm de profundidad, con $17,53$ y $16,93 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente (Gráfica 2). Al respecto, Williams y Haynes (1992) demostraron que entre un 15 - 31 % de la aplicación de azufre en suelos andisoles cubiertos con praderas, era retenido en las capas superiores del suelo.

Reacción del suelo (pH). En la Tabla 3 se presentan los valores de los cuadrados medios y su grado de significancia, para la primera evaluación (60 días de incubación); en él se observan diferencias estadísticas altamente significativas ($P < 0,01$) en el factor profundidad para la fuente sulfato de

calcio dihidratado y en la interacción dosis x profundidad cuando se utilizó sulfato de amonio y sulfato de magnesio. La aplicación de S - elemental no afectó los factores evaluados (dosis y profundidad).

Los valores promedio de pH obtenidos con las diferentes fuentes de azufre empleadas para la interacción dosis por profundidad se observan en la Gráfica 3. Se infiere que aquellas fuentes que presentan alta solubilidad (sulfato de amonio y sulfato de magnesio), el pH se incrementa a medida que se profundiza en el suelo (10-20 y 20-30 cm), situación que no ocurre con el sulfato de calcio donde los valores más altos de pH se encuentran en las primeras capas evaluadas (0-10 y 10 - 20 cm).

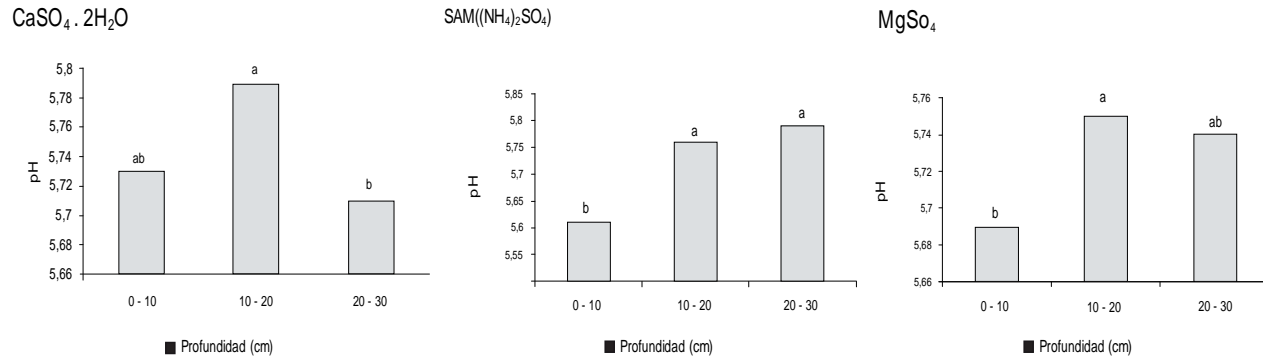
Las fuentes empleadas, excepto el S - elemental, influyeron, a los 60 días de incubación, sobre el pH inicial del suelo por efecto de la aplicación de azufre. La literatura reporta que, en general, la adición de S al suelo disminuye el pH del suelo (Bohn, *et al.*, 1993; Burbano, 2001; Tisdale, *et al.*, 1993), situación contraria a la encontrada a los 60 días de incubación, lo cual se puede explicar por el alto contenido de materia orgánica de los suelos estudiados, que además tienen una alta

Tabla 3. Análisis de varianza para el pH del suelo obtenido al aplicar diferentes fuentes y dosis de azufre, evaluado a tres profundidades, a los 60 días de incubación

F de V	GL	CM				5%	1%
		CaSO ₄ ·2H ₂ O	(NH ₄) ₂ SO ₄	S	MgSO ₄		
Bloques	3	0,0027 ^{ns}	0,0247 ^{ns}	0,0016 ^{ns}	0,0149 ^{ns}	3,86	6,99
Dosis	3	0,0099 ^{ns}	0,0896 ^{**}	0,0093 ^{ns}	0,0088 ^{ns}	3,86	6,99
Residual (a)	9	0,0082	0,0128	0,0072	0,0043		
Profundidad	2	0,0248 [*]	0,15 ^{**}	0,0123 ^{ns}	0,0179 [*]	3,40	5,61
Dosis x Profundidad	6	0,0078 ^{ns}	0,0389 [*]	0,0031 ^{ns}	0,0149 [*]	2,51	3,67
Residual (b)	24	0,0054	0,0097	0,0059	0,0037		
TOTAL	47	0,0072	0,026	0,006	0,0069		

NS No significativo *Significativo ** Altamente significativo

Gráfica 3. Evaluación del pH (60 días de incubación) obtenido por la aplicación de diferentes fuentes portadoras de azufre aplicadas en cuatro dosis. Prueba de Tukey



Promedios con la misma letra no son significativos

capacidad de intercambio iónico y presencia de arcillas amorfas (alófana), responsables de la neutralización del efecto acidificante del ion sulfato y predominio del efecto del ion acompañante de las fuentes utilizadas como el Ca, Mg y NH₄⁺ que permanecerían en la solución del suelo, siendo los responsables del incremento en los valores de pH.

En los suelos sin adición de azufre (testigo absoluto), se observó un decrecimiento leve del pH después de la incubación debido a una ligera acidificación natural, atribuible a la mineralización del nitrógeno orgánico existente

en el suelo, producto de la liberación de CO₂ (Jaramillo, 2002).

Al realizar el ANDEVA para la evaluación del pH después de 120 días de incubación (Tabla 4), la reacción del suelo, con la adición de sulfato de calcio dihidratado y sulfato de magnesio presentó diferencias estadísticas significativas (P < 0,05) para las dosis; cuando se adicionó sulfato de amonio el pH presentó diferencias estadísticas altamente significativas (P<0,01) para la interacción dosis por profundidad. La aplicación de S - elemental no influyó estadísticamente sobre el pH del suelo.

Tabla 4. Análisis de varianza para el pH del suelo obtenido al aplicar diferentes fuentes y dosis de azufre, evaluado en tres profundidades, a los 120 días de incubación

F de V	GL	CM				Significancia	
		CaSO ₄ ·2H ₂ O	(NH ₄) ₂ SO ₄	S	MgSO ₄	5%	1%
Bloques	3	0,008 ^{ns}	0,0056 ^{ns}	0,0025 ^{ns}	0,0033 ^{ns}	3,86	6,99
Dosis	3	0,033*	0,27**	0,0066 ^{ns}	0,0433**	3,86	6,99
Residual (a)	9	0,0068	0,0125	0,0044	0,0044		
Profundidad	2	0,005 ^{ns}	0,095**	0,0050 ^{ns}	0,0100 ^{ns}	3,40	5,61
Dosis x Profundidad	6	0,03 ^{ns}	0,053**	0,0110 ^{ns}	0,0066 ^{ns}	2,51	3,67
Residual (b)	24	0,0093	0,0045	0,0077	0,0172		
TOTAL	47	0,0127	0,0332	0,0007	0,014		

NS No significativo

*Significativo

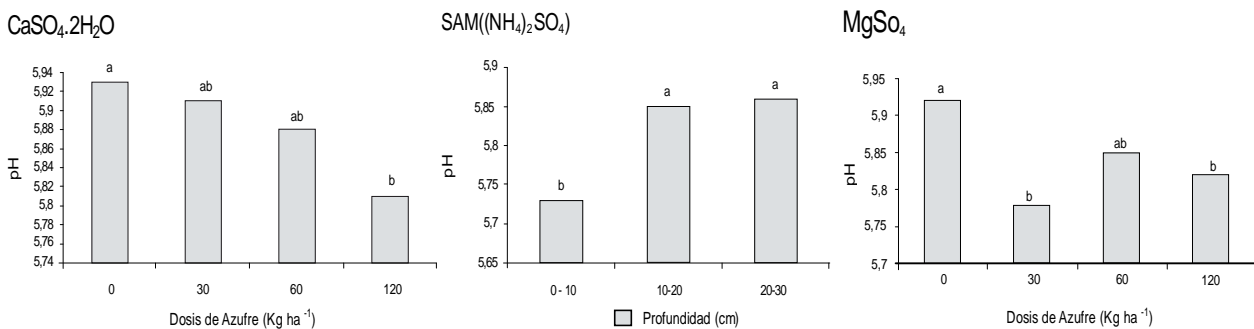
** Altamente significativo

Con la aplicación de sulfato de calcio dihidratado, el pH tiende a disminuir con el incremento en la dosis de azufre adicionado; con la aplicación de sulfato de magnesio, la respuesta es errática (Gráfica 4). Una de las propiedades más destacables del sulfato de calcio dihidratado es su mediana solubilidad en agua pura (2.5 g/L a 25°C), considerablemente mayor a la de otros minerales como la calcita, pero mucho menor que las sales solubles (Porta, *et al.*, 2003), lo cual pudo influir en su efecto acidificante a los cuatro meses de incubación (Gráfica 4), otra explicación podría ser que después de los dos primeros meses de incubación donde pueden

prevalecer los fenómenos de inmovilización y fijación del ion sulfato, la presencia de una mayor tasa de oxidación microbiológica o bioquímica, conduciría a una disminución del pH del suelo (Brady, 1990; Deng y Dick, 1990; Miyamoto, 1998).

Con la adición de sulfato de amonio, el comportamiento observado a los 60 y 120 días de incubación es similar, es decir, un incremento del pH del suelo con la profundidad de evaluación (Gráfica 4), lo cual posiblemente se deba al efecto del ion amonio, el cual tiende a incrementar el pH del suelo.

Gráfica 4. Evaluación del pH (120 días de incubación) obtenido por la aplicación de diferentes fuentes portadoras de azufre, aplicadas en cuatro dosis. Prueba de Tukey



Promedios con la misma letra no son significativos

CONCLUSIONES

La adición de azufre elemental (S⁰), no influyó sobre la movilidad, disponibilidad y el cambio en el pH del suelo estudiado durante los 120 días de incubación.

A los dos meses de incubación, no se encontró diferencias en la cantidad de azufre (SO₄²⁻) con la profundidad de evaluación, su disponibilidad depende de la dosis de aplicación del elemento. A los cuatro meses, depende de la dosis para el

sulfato de calcio y el sulfato de magnesio y tanto de la dosis como de la profundidad de evaluación con el sulfato de amonio.

El comportamiento del pH a los 60 y 120 días de incubación depende de la profundidad de evaluación para el sulfato de calcio; de la dosis y profundidad de evaluación para el sulfato de amonio y para el sulfato de magnesio inicialmente depende de la dosis y profundidad de evaluación y posteriormente solo de la dosis aplicada.

BIBLIOGRAFÍA

- ANDERSON, J., SCHINGOETHE, K, KALS-CHEUR and HIPPEN, A. 2006. El azufre en los granos de destilería para el ganado lechero. *J. Dairy Sci.* 89:3133-42.
- BARRERA, L. 2001. Suelos y fertilización en el cultivo de la papa. En: Seminario fertilización de cultivos. Medellín, Colombia, SCCS. Noviembre. Pp. 31- 55
- BRADY, N. 1990. The nature and properties of soils. 10ª ed. Prentice-Hall, New York, USA. 590 p.
- BOHN, H., McNEAL, B. and O'CONNOR, G. 1993. Química del suelo. México, Editorial Limusa. 370p.
- BURBANO, H. 2001. El azufre en el suelo. En: Los elementos secundarios (Ca, Mg, S) y el silicio en la agricultura. Bogotá, Colombia, SCCS. Pp 24-49.
- BURBANO, H. 1984. El componente bioquímico en la productividad y la fertilidad del suelo. En: Fertilidad de suelos. Diagnóstico y control. SCCS. Pp. 99 – 140.
- CHAPMAN, S. 2000. Thiobacillus populations in some agricultural soils. *Soil Biol. Biochem.* 22:479-482.
- CORPONARIÑO. 2004. Actualización del diagnóstico físico-biótico y socioeconómico y formulación del plan de ordenamiento y manejo integral del río Bobo en el departamento de Nariño. Pasto. 120 p.
- DENG, S., and DICK, R. 1990. Sulfur oxidation and Rhodanese activity in soils. *Soil Sci.* 150:552-560
- ESPTEIN, E and BLOOM, A. 2004. Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives. 2. Ed. Sunderland, Sinaur Associates. Pp. 44-45.
- GONZÁLEZ, H. 2003. Disponibilidad del azufre en algunos suelos de la zona cafetera colombiana y su relación con la fertilización. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad de Caldas, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Manizales. 79 p.
- GUERRERO, R. 2002. La fertilización del cultivo de la papa en Colombia. Bogotá, Monómeros Colombo-Venezolanos, Bogotá. 26 p.
- HANEKLAUS, S., HAGEL, I., PAULSEN, H. and SCHNUG, E. 2007. Objectives of plant nutrition research in organic farming. *Landbauforsch. Volk.* 52: 61-68
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (IGAC). 2004. Estudio general de suelos y zonificación de tierras, departamento de Nariño. Bogotá, IGAC. CDR.
- INSUASTY, L., BURBANO, H. y MENJIVAR, J. 2008. Movilidad del cadmio en suelos cultivados con papa en Nariño, Colombia. *Acta Agronómica (Palmira)* 57 (1): 51 – 54.
- JANSEN, H. and BETTANY, J. 1986. Release of available sulphur from fertilizers. *Can J. Soil Sci.* 66. 91 – 103.
- JANZEN, H, and ELLER, B. 2001. Sulfur dynamics in cultivated, temperate agroecosystems. In: Douglas, G; Maynard, D. (Eds). *Sulfur in the environment.* New York, Marcel Dekker. Pp 11-44.

- JARAMILLO; D. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. 613 p.
- MIYAMOTO, S. 2000. Use of acids and acidulants on Alkali soils and water. Pp. 217-255. *In* A. Wallace and R.E. Terry (eds.) Handbook of soil conditioners substances that enhance the physical properties of soil. Part III. Mineral soil conditioners. Marcel Dekker, New York, USA.
- MIYAMOTO, S. 1998. Use of acids and acidulants on Alkali soils and water. p. 217-255. *In* A. Wallace and R.E. Terry (eds.) Handbook of soil conditioners substances that enhance the physical properties of soil. Part III. Mineral soil conditioners. Marcel Dekker, New York, USA.
- OLIVERIO, G., SEGOVIA, F. y LÓPEZ, G. 2001. Fertilizantes para una Argentina de 100 millones de toneladas". Foundation "Producir Conser- vando". Buenos Aires, Argentina. Fertilizar ma- nual. 48 p.
- PORTA, J. LÓPEZ-ACEVEDO, M. y ROQUERO, C. 2003. Edafología para la agricultura y el me- dio ambiente. Ed. Mundi Prensa, Madrid, Espa- ña. 807 p.
- SAGGAR, S., and BOLAN, N. 2003. Gaseous emissions of nitrogen from grazed pastures: processes, measurements and modeling, envi- ronmental implications, and mitigation. *Ad- vances in Agronomy* 84, 37-102
- SALGADO, L. 1996. Conceptos generales sobre salinidad. Boletín de Extensión N° 41.. Universi- dad de Concepción, Chillán, Chile. pp. 1-43.
- SAMPAIO, E.; FAQUIN, V.; e GONTIJ, P. 2000. Relações entre teores foliares de nutrientes e produção do cafeeiro (*Coffea arabica* L) submetido a doses de calcario e gesso. *Ciencia e Agrotecnologia*, Lavras, 23 (4): 857-864.
- TAN, K. 1993. Principles of soil chemistry. 2a ed. Marcel Dekker, New York, USA. 210 p.
- TIBAQUIRÁ, H. 2000. Determinación de los niveles de azufre disponible en los suelos de las subestaciones experimentales Maracay y Líbano. Chinchiná, Cenicafé, 39 p.
- TISDALE, L., HAVLIN, L.; BEATON, D. and NELSON, L. 1993. Soil fertility and fertilizers. Sulfur, Calcium and Magnesium. 6. Ed. New Jersey, Prentice Hall, Pp 217-244.
- UNIGARRO A. y CARREÑO M. 2005. Métodos químicos para el análisis de suelos. San Juan de Pasto, Universidad de Nariño. 72 p.
- WILLIAMS, P. and HAYNES, R. 1992. Cycling of P and S through the soil – plant- animal system under intensively grazed grass – clover pastures. Vol 4 pp. 276 – 281. International Congress of Soil Science, Kyoto, Japan