

## DISPONIBILIDADE DE ENXOFRE EM SOLOS BRASILEIROS. I. AVALIAÇÃO DOS POTENCIAIS DE MINERALIZAÇÃO DE NITROGÊNIO E ENXOFRE POR INCUBAÇÃO ABERTA\*

*Huberto José Kliemann\*\*  
Eurípedes Malavolta\*\*\**

### RESUMO

Conduziram-se em laboratório dois experimentos de incubação aberta em colunas com 50 g de terra, na ausência e presença de calagem, usando solos provenientes dos Estados de São Paulo, Minas Gerais e Goiás, com teores de argila entre 8 e 60%, de carbono entre 0,5 e 3,0% e de enxofre entre 0,0104 e 0,0319 %. No primeiro experimento utilizaram-se os lixiviados para a determinação do nitrogênio mineral ( $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$ ) e do enxofre mineral ( $\text{S-SO}_4^-$ ). No segundo experimento adicionou-se enxofre radioativo ( $^{35}\text{S}$ , livre de carregador, na forma de  $\text{H}_2^{35}\text{SO}_4$ ), com atividade inicial de 0,62  $\mu\text{Ci.g}^{-1}$  de solo no tempo "zero" de incubação, previamente à obtenção do primeiro extrato. Estimaram-se os potenciais de mineralização de nitrogênio e enxofre por equação hiperbólica. Os solos arenosos e de baixos teores de carbono possuem pequenos potenciais de mineralização de nitrogênio e enxofre nativos, sendo afetados de forma não significativa pela calagem. Os solos argilosos e com mais altos teores de carbono têm potenciais de mineralização mais elevados, com efeitos significativos da calagem. As meias-vidas do nitrogênio e do enxofre foram modificadas pela calagem, não se verificando proporcionalidade nos índices de mineralização dos dois elementos. A mineralização do nitrogênio e do enxofre e o decaimento da atividade específica do  $^{35}\text{S}$  estabilizou-se por volta da oitava semana de incubação, tanto na ausência quanto na presença de calagem.

---

\* Parte do trabalho de tese de Doutorado (ESALQ/USP) do primeiro autor. Entregue para publicação em dezembro de 1993.

\*\* Docente da Escola de Agronomia da Universidade Federal de Goiás, C.P. 131. CEP 74001-970. Goiânia - GO.

\*\*\* Pesquisador do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP), Piracicaba-SP.

## INTRODUÇÃO

O interesse em se determinar as quantidades de nitrogênio e enxofre mineralizados em um dado tempo é devido ao fato de que ambos os elementos, na sua maior proporção, fazem parte da matéria orgânica. A absorção de  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ , formas predominantemente aproveitadas nas condições de campo, exige, pois, sua mineralização (liberação de formas reduzidas dos esqueletos carbônicos) e oxidação.

A maioria dos estudos sobre mineralização de nitrogênio e enxofre tem envolvido períodos curtos de incubação. Inicialmente supunha-se que os índices relativos de mineralização dos dois elementos fossem similares (WHITE, 1959). Todavia, essa suposição não conseguiu explicar resultados em que a razão N/S foi maior que a da matéria orgânica (NELSON, 1964). Alguns trabalhos, no entanto, mostraram razões iguais às da matéria orgânica (NELSON, 1964; KOWALENKO & LOWE, 1975; TABATABAI & AL-KHAFAJI, 1980). Contradição maior ainda é relatada por SAGGAR *et al.* (1981), em cujo trabalho ocorreu mineralização líquida de nitrogênio e concomitante imobilização do enxofre.

Explicações plausíveis para esse comportamento do enxofre no solo estão nos processos de mineralização envolvidos. Mc GILL & COLEMAN (1981) sugerem que existem mecanismos específicos de mineralização para cada elemento, além de enzimas, como a sulfo-hidrolase e a aril-sulfatase, que são altamente específicas na liberação de enxofre-sulfato de ésteres sulfatados. É a chamada mineralização "bioquímica", resultante da solicitação específica por enxofre. Por outro lado, a mineralização "biológica", tanto do N quanto do S, decorre da utilização do carbono como fonte de energia e não da demanda específica por nitrogênio ou enxofre. A mineralização líquida do enxofre é, então, conseqüência dos dois mecanismos (TABATABAI & BREMNER, 1978a,b; BETTANY & STEWART, 1983).

Outra explicação possível para os resultados, aparentemente contraditórios, está nos métodos de incubação usados em laboratório para determinar os índices de mineralização do enxofre orgânico. Dados de SAGGAR *et al.* (1981), obtidos por incubação fechada, mostraram imobilização líquida do enxofre e mineralização líquida do nitrogênio. MAYNARD *et al.* (1983), em sistema de incubação aberta e com lixiviação periódica do N e do S mineralizados com solução diluída de  $\text{CaCl}_2$ , mostraram que há mineralização líquida de ambos os elementos. Os autores sugerem que na incubação fechada

existe um mecanismo retroalimentador que desativa as enzimas (sulfatases) envolvidas na mineralização bioquímica.

O presente trabalho teve por objetivo estimar os potenciais de mineralização de nitrogênio e enxofre por incubação aberta e verificar os efeitos da calagem na meia-vida do nitrogênio e enxofre nativos e no decaimento da atividade específica de  $^{35}\text{S}$  em solos com vários teores de carbono e textura.

## MATERIAL E MÉTODOS

Utilizaram-se amostras de solos provenientes dos Estados de São Paulo, Minas Gerais e Goiás. A caracterização física e química encontra-se na Tabela I. As análises químicas de rotina foram feitas segundo CATANI & JACINTHO (1974) e as físicas segundo EMBRAPA (1979); a percentagem de carbono segundo o método Walkley-Black (ALLISON, 1965) e o nitrogênio mineral segundo BREMNER (1965).

Tabela I - Características gerais das amostras de terra<sup>(1)</sup> usadas no experimento (média de 3 repetições)

Solo (local e classificação)	Areia Silta Argila			Dg <sup>(2)</sup>	CE <sup>(3)</sup> %	C %	N %	P ppm	K ppm	Ca	Mg	Al	H	pH	NC <sup>(4)</sup>
	Areia	Silta	Argila												
São Pedro-SP, AQt	89,1	2,8	8,1	1,511	25,8	0,85	0,0 30	5	47	1,42	0,50	0,11	1,22	5,0	0,374
Assis-SP, LEm	84,2	2,6	13,2	1,423	26,5	0,50	0,0 84	11	13	0,64	0,08	0,08	205	4,4	1,338
Pirassununga2-SP, LVm(ccrr)	66,2	4,4	29,3	1,273	16,8	0,79	0,0 68	4	20	0,74	0,08	0,61	2,96	5,2	1,856
Matão-SP, LEm(ccrr)	77,9	5,0	17,1	1,292	14,5	1,51	0,1 16	3	77	2,26	1,00	0,00	1,98	6,0	0,430
Catalão-GO, LEd(ccrr)	30,9	15,0	54,1	1,156	50,2	2,48	0,1 50	8	40	0,50	0,50	1,22	7,07	4,1	4,406
S.S. Paraíso2-MG, LE	40,8	23,8	35,4	1,516	40,0	1,61	0,1 30	2	47	0,40	0,42	0,08	4,96	5,4	2,283
Rio Paranaíba-MG, LVd(ccrr)	22,4	17,4	60,2	1,154	56,4	3,03	0,1 64	2	37	0,32	0,30	0,28	7,84	5,1	4,340

<sup>(1)</sup> Amostras superficiais coletadas de 0 a 20 cm de profundidade

<sup>(2)</sup> Densidade global em g.cm<sup>-3</sup>

<sup>(3)</sup> Necessidade de calagem por saturação de bases a 70 %, segundo QUAGGIO *et al.* (1983)

<sup>(4)</sup> Capacidade de embebição

Os solos foram passados em peneira de 1 mm e, em seguida, foi feita a calagem pela metodologia de QUAGGIO (1983), para atingir 70% da

saturação de bases. Procedeu-se à incubação do solo, na ausência e na presença de calagem, com umidade correspondente a 80% da capacidade de embebição, durante um período de 20 dias, em sacos plásticos semi-abertos, para permitir a aeração.

Os procedimentos de incubação aberta e lixiviação das amostras de terra foram descritos por STANFORD & SMITH (1972) e TABATABAI & AL-KHAFABI (1980), com as modificações introduzidas por KLIEMANN (1987):

a) antes da introdução das amostras de terras nas colunas de lixiviação, na forma de reagentes p.a. adicionou-se 200 ppm de P: 118 ppm como fosfato de potássio monobásico e 82 ppm como fosfato de amônio monobásico; 150 ppm de K como fosfato de potássio monobásico; 40 ppm de Mg, como nitrato de magnésio hexa-hidratado; 200 ppm de Ca, como cloreto de cálcio di-hidratado; 1 ppm de Mo, como hepta-molibdato de amônio tetra-hidratado; 0,5 ppm de B, como ácido bórico; 1,5 ppm de Cu, como cloreto de cobre, e 5 ppm de Zn, como cloreto de zinco. Utilizou-se 50 g de terra seca ao ar, peneirada em 1 mm, misturando-a com sílica (diâmetro de 2-3 mm) na proporção de 1:1. No mesmo dia procedeu-se à primeira lixiviação com 100 ml de KCl 0,01 M, a partir do qual se estabeleceu o tempo "zero" de incubação. A partir daí, seguiram-se os procedimentos de STANFORD & SMITH (1972), durante 14 semanas de incubação aberta.

b) em outra bateria de colunas de lixiviação, com tratamentos idênticos aos usados acima, utilizou-se enxofre radioativo como traçador ( $^{35}\text{S}$ , livre de carregador, na forma de  $\text{H}_2^{35}\text{SO}_4$ ), com atividade inicial de 0,62134 microCi.g<sup>-1</sup> de terra no tempo "zero" de incubação. Para a homogenização do  $\text{H}_2^{35}\text{SO}_4$  com a terra, misturou-se o traçador (1 ml diluído para 31,067 microCi/ml) com 5 g de terra, em porções sucessivas, até completar 50 g por coluna. A lixiviação seguiu a técnica acima descrita, durante um período de 10 semanas de incubação aberta.

Para a detecção de  $^{35}\text{S}$  nos lixiviados em KCl 0,01 M em solução aquosa, usou-se o método de NASCIMENTO & LOBÃO (1977). Para contornar o problema de cristalização da emulsão de TRITON X-100 (fornecido pela Central de Drogas do CNPq), adotou-se o procedimento de PATTERSON & GREEN (1965), utilizando-se 1 ml de lixiviado, 3 ml de etanol p.a. e 10 ml de solução cintiladora. Os valores finais da atividade  $^{35}\text{S}$  em todos os lixiviados foram corrigidos para o tempo "zero" de incubação.

A avaliação estatística dos dados experimentais (N e S mineralizados) foi feita considerando-se os valores acumulados a partir da segunda lixiviação.

Para estimar os potenciais de mineralização ( $N_o$  e  $S_o$ ), empregou-se a equação hiperbólica de STANFORD & SMITH (1972):

$$y = (y_o \cdot t) / (b \cdot y_o + t) \quad (1)$$

onde,

$y$  = N ou S mineralizados cumulativamente, a partir do tempo "zero" de incubação (microgramas de N ou S.g<sup>-1</sup> de solo);

$y_o$  = N ou S potencialmente mineralizáveis ( $N_o$  ou  $S_o$ );

$t$  = tempo (semanas);

$b$  = constante (semanas.microgramas de N ou S.g<sup>-1</sup> de solo)<sup>-1</sup>;

$T_c$  = meia-vida (tempo necessário para mineralizar a metade do  $N_o$  ou  $S_o$  potencialmente mineralizável).

A constante  $b$  pode ser escrita sob a forma:

$$b = T_c / N_o \text{ ou } b = T_c / S_o.$$

Então:

$$y = (y_o \cdot t) / (T_c + t) \quad (2)$$

Utilizou-se o algoritmo iterativo de BORATTO (1984) para o cálculo da equação hiperbólica.

Os experimentos foram conduzidos em laboratório, na ausência e presença de calagem.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados de nitrogênio e enxofre mineralizados durante 14 semanas de incubação aberta encontram-se na Tabela II e III, assim como os parâmetros das equações hiperbólicas e tempos necessários (meias-vidas) para estimar as metades do nitrogênio ( $1/2 N_o$ ) e do enxofre ( $1/2 S_o$ ) potencialmente mineralizáveis. Na Figura I verifica-se que a mineralização se processa em razões bastante diferentes, principalmente quando se analisam os efeitos da calagem. Nos solos com baixos teores de carbono e textura arenosa a média (São Paulo, Assis e Matão), a calagem não alterou o tempo necessário para mineralizar a

metade do N e do S potencialmente mineralizáveis. Nos solos mais argilosos, (Catalão, São Sebastião do Paraíso e Rio Paranaíba), os potenciais de mineralização foram substancialmente modificados pela calagem. Isso indica que esses solos têm estoques de N e S capazes de ser liberados para as plantas, desde que sejam removidas as condições de acidez que impedem a sua pronta mineralização. Os potenciais de mineralização calculados para os dois elementos estimam que eles se mineralizam na mesma razão dos seus teores originais dos solos. MAYNARD *et al.* (1983) observaram que a mineralização de N e S se dá em proporções diversas: as razões de  $N-NO_3^-/S-SO_4^{2-}$  mineralizados por incubação aberta e fechada são diferentes daquelas razões de N orgânico/S orgânico da matéria orgânica dos solos.

Tabela II - Efeitos da incubação aberta na mineralização de nitrogênio e enxofre em solos em condições de microcolunas submetidos à lixiviação periódica com KCl0,01 M

Solos (locais)	E <sup>2)</sup>	Dados de nitrogênio/enxofre mineralizados -ppm													
		0 <sup>1)</sup>		2		4		6		8		10		14	
		sc <sup>3)</sup>	cc	sc	cc	sc	cc	sc	cc	sc	cc	sc	cc	sc	cc
São Pedro	N	54,6	52,9	12,2	8,5	8,4	5,5	5,3	2,6	3,0	2,9	2,8	2,8	3,2	3,4
	S	11,2	11,8	15,5	22,5	8,7	7,5	1,7	2,1	1,7	1,7	2,1	2,1	2,1	2,1
Assis	N	27,3	25,7	6,5	14,8	4,0	8,2	3,7	4,4	3,3	2,8	2,9	2,7	3,1	2,7
	S	9,9	11,6	18,4	17,5	8,3	6,3	2,1	2,1	2,1	2,5	0,9	2,1	2,8	2,5
Pirassununga	N	12,0	10,1	22,1	22,4	7,0	5,1	6,1	3,8	3,7	3,1	3,6	2,8	3,0	3,4
	S	14,1	14,1	9,1	14,5	3,6	4,5	2,1	2,1	1,2	2,8	2,8	2,8	2,4	4,4
Matão	N	10,4	11,7	8,7	10,3	3,9	3,3	3,4	2,8	2,4	2,6	3,0	2,6	2,7	2,5
	S	15,3	16,6	13,2	15,3	6,3	6,2	2,8	2,5	2,1	2,1	2,5	0,9	3,8	1,7
Catalão	N	72,3	67,0	38,8	28,9	17,2	16,8	11,1	10,4	7,6	7,8	5,5	7,0	4,4	7,0
	S	10,7	22,9	4,7	19,2	4,7	7,5	2,8	6,3	2,1	2,1	2,1	2,5	2,5	1,7
S. Sebastião do Paraíso	N	14,7	16,5	17,0	31,0	12,4	14,3	6,2	7,3	3,8	5,0	4,0	4,5	2,8	5,2
	S	16,6	14,9	10,3	10,3	7,5	9,9	3,2	4,4	1,7	0,9	1,7	5,1	2,8	3,8
Rio Paranaíba	N	17,2	16,7	32,5	38,8	22,9	22,9	13,7	22,8	7,2	11,9	4,9	8,3	5,2	8,1
	S	14,1	20,6	7,1	18,8	8,3	10,3	2,5	5,1	1,7	4,4	11,7	4,0	0,9	2,8

<sup>1)</sup> Tempos de incubação com os intervalos de lixiviação (semanas)

<sup>2)</sup> N (nitrato+amônio); S(sulfato)

<sup>3)</sup> sc - ausência de calagem; cc - presença de calagem

Matematicamente, existem vários modelos que podem ser usados para estimar o N ou S cumulativamente mineralizados em função do tempo (STANFORD & SMITH, 1972; TABATABAI & AL-KHAFAJI, 1980; MOLINA *et al.* 1980; JUMA *et al.* 1984). Os potenciais de mineralização de nitrogênio ( $N_0$ ), estimados pelos modelos hiperbólicos e exponencial de primeira ordem, são considerados estimadores pobres para o rendimento das

plantas e absorção de N. JUMA *et al.* (1984) verificaram que ambos os modelos estimam corretamente o N mineralizado durante 14 semanas de incubação, porém, o N potencialmente mineralizável e sua meia-vida são dependentes do modelo usado. Nas condições desse experimento, o modelo hiperbólico ajustou-se estreitamente aos dados de mineralização de N e S, como se observa pelos coeficientes de determinação da Tabela III.

Tabela III - Parâmetros<sup>(1)</sup> das equações hiperbólicas e tempos necessários para estimar as metades do enxofre ( $1/2S_0$ ) e do nitrogênio ( $1/2N_0$ ) potencialmente mineralizáveis por incubação aberta na ausência e presença de calagem

Solos (locais)	C <sup>(2)</sup>	Enxofre					Nitrogênio				
		S <sub>0</sub> <sup>(3)</sup>	T <sub>1/2</sub> <sup>(4)</sup>	b <sup>(5)</sup>	R <sup>2</sup>	1/S <sub>0</sub>	N <sub>0</sub> <sup>(3)</sup>	T <sub>1/2</sub> <sup>(4)</sup>	b <sup>(5)</sup>	R <sup>2</sup>	1/2N <sub>0</sub>
São Pedro	sc	36,86	1,90	0,0515	0,9984	18,43	49,50	5,62	0,1136	0,9986	24,75
	cc	41,61	1,70	0,0410	0,9984	20,80	50,17	5,83	0,1182	0,9990	25,08
Assis	sc	16,12	1,98	0,0544	0,9981	18,16	45,54	12,62	0,2773	0,9985	22,72
	cc	18,06	2,49	0,0634	0,9996	19,03	45,72	4,12	0,0903	0,9996	22,86
Pirassununga	sc	28,91	5,00	0,1729	0,9965	14,46	59,11	3,90	0,0658	0,9943	29,65
	cc	44,66	6,18	0,1384	0,9941	22,33	45,53	1,40	0,0527	0,9921	22,77
Matão	sc	38,90	4,13	0,1061	0,9965	19,45	49,30	9,78	0,1984	0,9876	24,64
	cc	33,49	2,30	0,0687	0,9995	16,75	37,88	5,66	0,1494	0,9987	18,94
Catalão	sc	31,73	10,26	0,0626	0,9983	15,86	49,30	9,78	0,0311	0,9984	47,98
	cc	48,21	3,03	0,1226	0,9983	24,11	37,88	5,66	0,0291	0,9927	49,15
S. Sebastião do Paraíso	sc	35,40	4,34	0,1226	0,9963	17,70	63,77	4,84	0,0407	0,9961	31,88
	cc	48,60	3,02	0,1276	0,9913	24,50	82,58	3,36	0,0392	0,9997	41,29
Rio Paranaíba	sc	27,38	4,80	0,1752	0,9941	13,69	120,14	4,70	0,0392	0,9952	60,07
	cc	59,28	4,98	0,0840	0,9991	29,90	168,90	6,65	0,0394	0,9958	84,45

<sup>(1)</sup> Os parâmetros foram estimados pela equação hiperbólica  $[N=(N_0 \times 1/(N_0 + t))]$  de STANFORD & SMITH (1972); JUMA *et al.* 1984)

<sup>(2)</sup> sc - ausência de calagem, cc - presença de calagem

<sup>(3)</sup> Valores dos potenciais de mineralização de enxofre (S<sub>0</sub>) e de nitrogênio (N<sub>0</sub>) e meias-vidas de enxofre e de nitrogênio.

<sup>(4)</sup> O tempo T<sub>1/2</sub> é dado em semanas

<sup>(5)</sup> b = constante [(semanas µg.g<sup>-1</sup> solo)<sup>-1</sup>] = T<sub>1/2</sub>/N<sub>0</sub> ou T<sub>1/2</sub>/S<sub>0</sub>.

Chama a atenção, no entanto, o fato de como os potenciais de mineralização são diferentemente afetados pela calagem nos solos argilosos de Catalão, São Sebastião do Paraíso e Rio Paranaíba. Sugere-se que uma fração de N e S é mineralizada por ação microbiológica e outra fração adicional de S, dessorvida pelo aumento do pH dos solos, como atestam os experimentos de WILLIAMS & STEINBERGS (1964), BARROW (1970) e PROBERT (1976).

Nos solos de textura arenosa, como os de Assis e São Pedro, a calagem praticamente não influenciou na mineralização de N e S, indicando estoques reduzidos de N e S totais, com tendência ao rápido esgotamento, como mostra a reduzida meia-vida do enxofre potencialmente mineralizável (Tabela III). Nos solos de Matão e Catalão a calagem diminuiu a meia-vida do enxofre, mas, por outro lado, acelerou a taxa de mineralização. Não havendo reposição, sob condições de cultivo intenso, ocorrerá o esgotamento do enxofre nativo dos

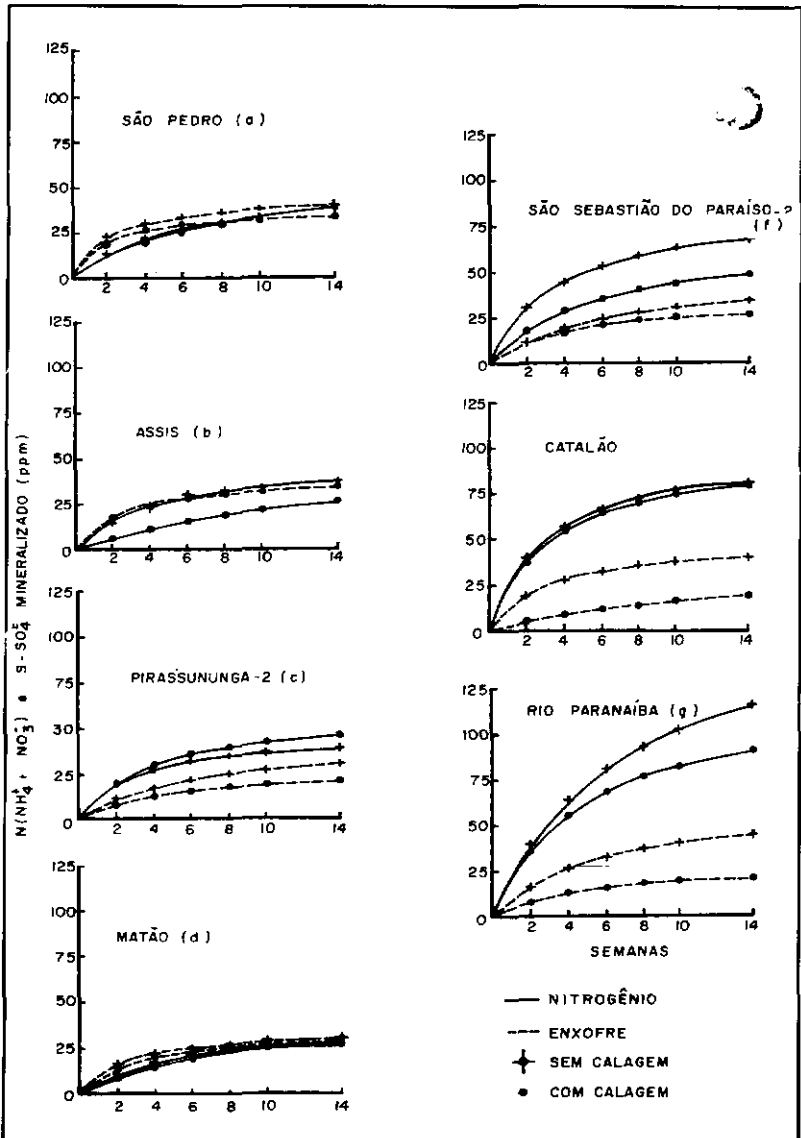


Figura 1 - Efeitos da incubação aberta em condições de micro-colunas e da calagem nas quantidades de nitrogênio mineralizados em função do tempo



solos. No solo de Rio Paranaíba, com 60,2% de argila e 3,03% de carbono, a calagem aumentou a mineralização de N e S, porém, a meia-vida do enxofre potencialmente mineralizável não se modificou significativamente, como ocorreu com a meia-vida do N, indicando que parte do nitrogênio mineralizado provém de *pools* diferentes daqueles do enxofre. É interessante observar que no solo de Catalão o potencial de mineralização ( $N_o$ ) e a meia-vida do nitrogênio não se alteraram com a calagem, ao contrário do que se observou para o enxofre. NEPTUNE *et al.* (1975) sugerem que cerca de 50% do enxofre tornado disponível é originário de compostos diferentes dos sulfonitrogenados.

Comportamento diverso foi observado nos solos de Pirassununga e São Sebastião do Paraíso: a calagem, além de intensificar a mineralização de enxofre, também prolongou a sua meia-vida. Nos dois solos verificou-se o contrário para a meia-vida do nitrogênio, todavia, não se encontrou explicação plausível para o menor potencial de mineralização de N ( $N_o$ ) na presença de calagem.

McGILL & COLEMAN (1981) propuseram um modelo conceitual para explicar a dinâmica do enxofre orgânico dos solos, em que os mecanismos que estabilizam o carbono, o nitrogênio, o fósforo e o enxofre orgânico não são necessariamente comuns a todos. Enquanto que o C e o N são estabilizados conjuntamente e mineralizados por mecanismo biológico (fornecimento de energia), o P orgânico e os ésteres de S são estabilizados independentemente da fração orgânica principal e mineralizados por processo bioquímico (solicitação específica de um elemento). A mineralização bioquímica resulta na liberação de fosfato e sulfato inorgânicos, a partir de frações orgânicas, via catálise enzimática exterior à membrana celular. De acordo com BETTANY & STEWART (1983), ela é fortemente dependente do potencial de suprimento e da necessidade do elemento liberado.

Nos solos tropicais altamente intemperizados parte significativa do enxofre, na forma de sulfatos inorgânicos, encontra-se adsorvida ao complexo coloidal, sendo sua dessorção fortemente dependente de pH e da presença de fosfatos inorgânicos (BARROW, 1970).

Os parâmetros das equações hiperbólicas na Tabela III desse experimento sugerem que nos latossolos argilosos de Catalão, São Sebastião do Paraíso e Rio Paranaíba uma fração significativa de S que ficou disponível é proveniente do  $S-SO_4^-$  dessorvido pelo aumento do pH, além da fração

orgânica mineralizada. Entretanto, para se conhecer a provável origem do S potencialmente disponível para as plantas, é mister que se determinem as frações mais lábeis, como o S-reduzível em HI (TSUJI & GOH, 1979) e a fração que é desorvida pela calagem (WILLIAMS & STEINBERGS, 1964; PROBERT, 1976).

Na Figura II está ilustrada a evolução da atividade específica em função do tempo de incubação. As amostras incubadas, no momento da primeira lixiviação, tinham atividade específica de 0,6134 microCi.g<sup>-1</sup> de solo. Vê-se a flagrante diferença na atividade específica, de <sup>35</sup>S no tempo "zero" de incubação, entre os solos estudados. Nos arenosos de São Pedro e Assis, a atividade específica mostrou-se mais elevada; nos solos argilosos de Catalão, São Sebastião do Paraíso e Rio Paranaíba ela é significativamente mais elevada. Verifica-se ainda que a calagem influenciou na atividade específica do H<sub>2</sub><sup>35</sup>SO<sub>4</sub>.

Segundo COUTO *et al.* (1979), os teores de argila, os óxidos de ferro e alumínio, a matéria orgânica, o pH dos solos, os extratores usados, a temperatura e o tempo de reação determinam a maior e a menor adsorção de S-SO<sub>4</sub><sup>-</sup>.

A atividade específica mostra que a diluição isotópica de <sup>35</sup>S, a partir da segunda lixiviação, apresenta diferenças maiores nos solos argilosos, sob o efeito da calagem. No solo de Catalão, os dados de atividade específica da sexta para a décima semana de incubação mostraram que a calagem acelerou o processo de esgotamento do enxofre nativo. Isso se confirma, observando a meia-vida do enxofre (S<sub>0</sub>), que ficou reduzida a cerca de 30%, isto é, para 3 semanas na presença de calagem (Tabela III). No solo de Pirassununga verificou-se um fato diverso: a calagem aumenta o potencial de mineralização e também sua meia-vida. A atividade específica do <sup>35</sup>S, na ausência de calagem, praticamente se torna estacionária da segunda para a oitava semana de incubação e, a partir desta, torna a aumentar, o que configura o esgotamento do enxofre mineralizável. No solo de São Sebastião do Paraíso, tanto na ausência quanto na presença de calagem, a atividade específica decaiu até a décima semana; a partir daí, ela se estabilizou na presença de calagem, enquanto sem calagem novamente aumentou.

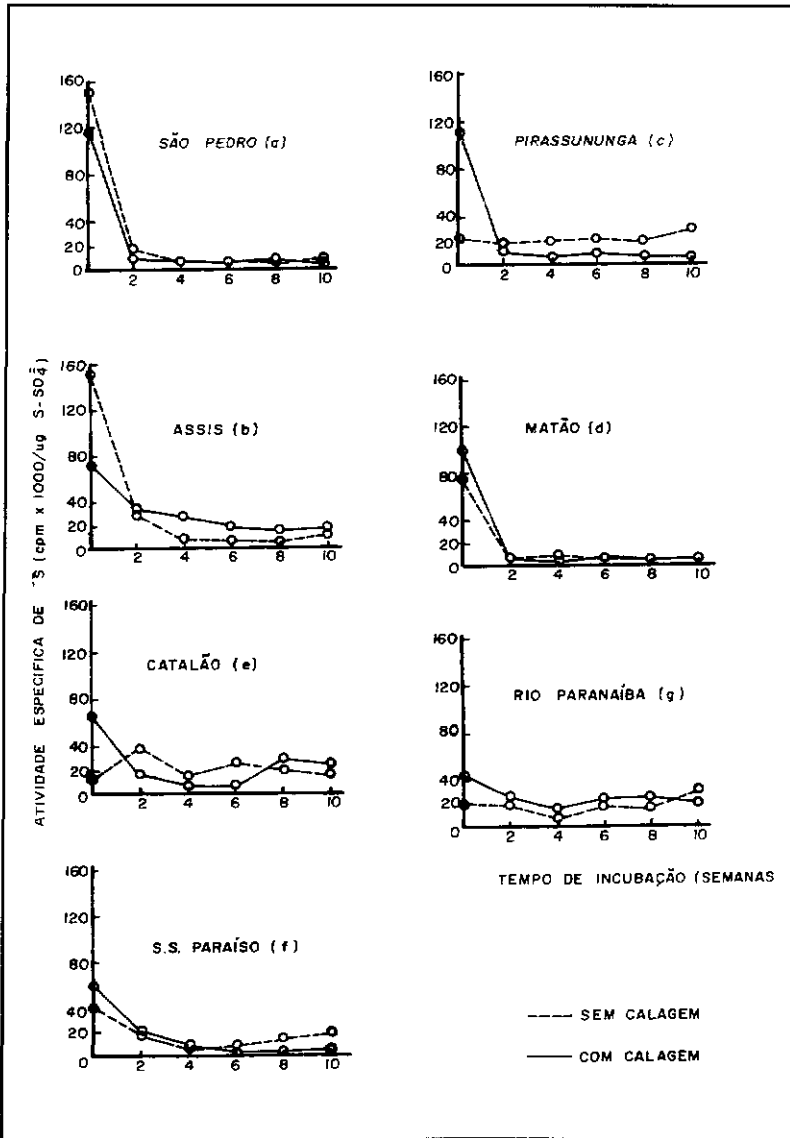


Figura II - Atividade específica de <sup>35</sup>S nos lixiviados em KCl 0,01 M dos solos, em condições de microcolunas, na ausência e presença de calagem em função do tempo de incubação aberta

Observando-se as Figuras I e II e a Tabela III, nota-se que aumentaram os potenciais de mineralização e a meia-vida do enxofre em função da calagem, explicando-se, assim, o aumento da atividade específica nos lixiviados a partir da sexta semana de incubação. No solo do Rio Paranaíba verificou-se queda na atividade específica de  $^{35}\text{S}$  até a quinta semana de incubação. A partir dessa data, na ausência de calagem, o aumento da atividade específica torna-se nítido: a mineralização se encerrou por esgotamento do enxofre nativo do solo. Nesse solo, embora a meia-vida não tenha sofrido alteração significativa nos tratamentos sem calagem, houve aumento significativo (da ordem de 100%) no potencial de mineralização de enxofre ( $S_0$ ) com sua presença, como se pode verificar na tabela III e na figura II.

Nos solos arenosos de São Pedro e Matão, embora se tenham observado diferenças na atividade específica de  $^{35}\text{S}$  no tempo "zero" de incubação, tanto na ausência quanto na presença de calagem, o comportamento foi similar a partir da segunda semana. As pequenas diferenças na atividade específica sob influência da calagem, verificadas nesses dois solos, justificam a diferença não significativa dos respectivos potenciais de mineralização (Tabela III). Todavia, não se encontrou uma explicação aceitável para a maior atividade específica inicial no solo de Assis, na ausência da calagem, apesar de os potenciais de mineralização apresentarem diferenças não significativas.

A diluição isotópica de  $^{35}\text{S}$  e a mineralização estabilizaram-se por volta da oitava semana de incubação, tanto na ausência quanto na presença de calagem, à semelhança de comportamentos observados por TSUJI GOH (1979) e MAYNARD *et al.* (1983).

## CONCLUSÕES

Os solos arenosos e de baixos teores de carbono possuem pequenos potenciais de mineralização de nitrogênio e enxofre nativos, sendo afetados de forma não significativa pela calagem. Os solos argilosos e com teores mais altos de carbono têm potenciais de mineralização mais elevados, com efeitos significativos da calagem.

As meias-vidas foram modificadas pela calagem, não se verificando proporcionalidade nos índices de mineralização dos dois elementos.

A mineralização do nitrogênio e do enxofre e o decaimento da atividade específica do  $^{35}\text{S}$  estabilizam-se por volta da oitava semana de incubação, tanto na ausência quanto na presença de calagem.

## ABSTRACT

### SULPHUR AVAILABILITY IN BRAZILIAN SOILS. I. EVALUATION OF NITROGEN AND SULPHUR MINERALIZATION POTENTIAL BY OPEN INCUBATION.

Two open incubation experiments in laboratory conditions were carried out, using columns containing 50 g of soils, from the States of São Paulo, Minas Gerais and Goiás (Brazil). The clay contents varied from 8.0 to 60.0%, total sulphur (S) from 0.0104 to 0.0319% and carbon from 0.50 to 3.03%. In the first experiment the leachate was used for the determination of mineral nitrogen (ammonium + nitrate) and mineral sulphur (sulphate). In the second incubation trial carrier free  $\text{H}_2^{35}\text{SO}_4$  (0.62 microCi.g<sup>-1</sup> soil) was applied at "zero" time of incubation. The mineralization potentials of native N and S were estimated by using hyperbolic equations. Sandy soils low in C possess small mineralization potentials, being unaffected by liming. The reverse is true in the case of clayey soils with higher C content. The half life of both N and S was modified by liming. There was not, however, a proportionality factor between the mineralization rates of the elements. The mineralization of native N and S, as well the specific activity of the added  $^{35}\text{S}$  tended to level off in the 8th week of incubation, no effect of liming being evident.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLISON, L.E. Organic carbon. In: BLACK, C.A. *et al.* (ed.) *Methods of soils analysis; chemical and microbiological properties*. Madison, ASA, cap. 90, 1965. p. 1367-1378. (Agronomy, 9).
- BARROW, N.J. Comparison of the absorption of molybdate, sulphate and phosphate by the soil. *Soil Sci.*, Baltimore, v.105, n.5, 1970, p.282-9.
- BETTANY, J.R.; SEWART, J.W.B. Sulphur cycling in soils. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE O USO DE TÉCNICAS NUCLEARES EM ESTUDOS DE FERTILIDADE DO SOLO E FERTILIZANTES. Piracicaba, CENA/USP. 1983. Resumos.

- BORATTO, F. *Basic para engenheiros e cientistas*. Rio de Janeiro, 1985. 120 p.
- BREMNER, J.M. 1965. Inorganic forms of nitrogen. In: BLACK, C.A. *et al.* (ed.). *Methods of soils analysis; chemical and microbiological properties*. Madison, ASA, cap. 88, 1965. p.1179-37. (Agronomy, 9).
- CATANI, J.A.; JACINTHO, O. *Avaliação da fertilidade do solo; métodos de análise*. Piracicaba, ESALQ/USP, 1974, 57 p. (mimeo).
- COUTO, W.; LATHWELL, D.J.; BOULDIN, J.R. 1979. Sulfate adsorption by two oxisols and alfisol of the tropics. *Soil Sci.*, Baltimore, v.127, n.1, 1979, p.108-16.
- EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. *Manual de métodos de análises de solos*. Rio de Janeiro, EMBRAPA, 1979. (mimeo).
- JUMA, N. G.; PAUL, E. A.; MARY, B. Kynetic analysis of net nitrogen mineralization. *Proc. Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v.48, n.4, 1984, p.753-7.
- KLIEMANN, H. J. Contribuição ao estudo da disponibilidade de enxofre em solos brasileiros. Piracicaba, 1987. Tese Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas. Piracicaba. ESALQ/USP. 231p.
- KOWALENKO, C. G.; LOWE, L. E. The evaluation of several extraction methods and closed incubation methods for soil sulfur mineralization, *J. Can. Soil Sci.*, Ottawa, v.55, n.1, 1971, p.1-8.
- MAYNARD, D. G.; STEWART, J. W. B.; BETTANY, J.R. Sulphur and nitrogen mineralization in soils compared using two incubation techniques. *Soil Biol. Biochem.*, Oxford, v.15, n.3, 1983, p.251-6.
- McGILL, W.S.; COLEMAN, C.V. Comparative aspects of cycling organic C, N, P and S through organic matter. *Geoderma*, Amsterdam, v.26,n.4, 1981, p.267-86.

- MOLINA, J.A.; CLAPP, C.E.; LARSON, W.E. Potentially mineralizable nitrogen in soil: The simple exponential model does not apply for first 12 weeks of incubation. *J. Soil Sci. Soc. Am.*, Madison, v.44, n.2, 1980, p.442-3.
- NASCIMENTO FILHO, V. F.; LOBÃO, A. O. *Deteção de P-32 em amostras de origem animal e vegetal por efeito Cerenkov, por cintilação líquida e detector G.M.* Piracicaba, CENA/USP, 1977. (Boletim técnico, C-47).
- NELSON, L.E. Status and transformation of sulfur in Mississippi soils. *Soil Sci.*, Baltimore, v.97, n.5, 1964, p.300-6.
- NEPTUNE, A. M. L.; TABATABAI, M. A.; HANWAY, J. J. Sulfur fractions and carbon-nitrogen-phosphorus relationships in some Brazilian and Iowa soils. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, Madison, v.39, n.1, 1975, p.51-5.
- PATTERSON, M.S.; GREEN, R.C. Measurement of low betaemitters in aqueous solutions by liquid scintillation counting of emulsions. *Anal. Chem.*, Washington, v.37, n.7, 1965, p.854-7.
- PROBERT, M.E. Studies of available and isotopically exchangeable sulphur in some North Queensland soils. *Plant & Soil*, The Hague, v.45, n.2, 1976, p.46-75.
- QUAGGIO, J. A. 1983. Métodos para determinação da necessidade de calagem em solos. In: RAIJ, B. VAN, (coord.). *Acidez e calagem no Brasil*. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1983, p.33-48.
- SAGGAR, S.; BETTANY, J.R.; STEWART, J.W.B. Sulphur transformations in relation to nitrogen and carbon in incubated soils. *Soil Biol. Biochem.*, v.13, n.2, 1981, p.499-511.
- STANFORD, G.; SMITH, S.J. Nitrogen mineralization potentials of soils. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, Madison, v.36, n.3, 1972, p.465-72.
- TABATABAI, M.A.; BREMNER, J.M. Arylsulfatase activity in soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Madison, v.34, n.2, 1970a, p.225-7.

- TABATABAI, M.A.; BREMNER, J.M. Factors affecting soil available sulfur in selected soils and soil profiles. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Madison, v.34, n.3, 1970b, p.427-9.
- TABATABAI, M.A.; AL-KHAFAJI, A.A. Comparison of nitrogen and sulfur mineralization in soils. *J. Soil Sci. Soc. Am.*, Madison, v.44, n.5, 1980, p.1000-6.
- TSUJI, T.; GOH, K.M. Evaluation of soil sulfur fractions as sources of plant available sulphur using radioactive sulphur. *N. Z. J. Agr. Res.*, Wellington, v.22, n.4, 1979, p.595-602.
- WHITE, J.G. Mineralization of nitrogen and sulphur in sulphur deficient soils. *N. Z. J. Agr. Res.*, Wellington, v.2, n.2, 1959, p.255-8.
- WILLIAMS, C.H.; STEINBERGS, A. The evaluation of plant sulphur in soils. II. The availability of adsorbed and insoluble sulphates. *Plant & Soil*, The Hague, v.21, n.1, 1964, p.50-62.