

# RELAÇÕES ENTRE MAGNETIZAÇÃO, ELEMENTOS TRAÇOS E LITOLOGIA DE DUAS SEQÜÊNCIAS DE SOLOS DO ESTADO DE MINAS GERAIS<sup>(1)</sup>

S. A. D. FERREIRA<sup>(2)</sup>, D. P. SANTANA<sup>(3)</sup>, J. D. FABRIS<sup>(3)</sup>, N. CURI<sup>(4)</sup>,  
E. NUNES FILHO<sup>(5)</sup> & J. M. D. COEY<sup>(6)</sup>

## RESUMO

Foram analisadas correlações e, em alguns casos, regressões entre magnetização e teores totais de Fe, Cu, Mn, Ti, Zn e Co, em duas seqüências de solos. A litologia variou com o grau de influência de tufito e rochas pelíticas do Grupo Bambuí (seqüência AP, da região fisiográfica do Alto Paranaíba) e de basalto e arenito (seqüência TM, da região do Triângulo Mineiro). Os valores de magnetização espontânea ( $\sigma$ ) seguiram o grau de influência das rochas máficas (tufito ou basalto) no material de origem. Foram encontrados coeficientes de correlação positivos e significativos entre  $\sigma$  e teores dos elementos traços para a TFSA de todas as amostras. A contribuição de cada fração granulométrica para a correlação global é, no entanto, distinta, nas duas seqüências. Na seqüência AP, a fração mais fina (argila) apresentou maiores correlações apenas para Cu e Ti, enquanto na TM as mais altas correlações vieram sistematicamente da fração grosseira (areia), para todos os elementos estudados.

**Termos de indexação:** solo magnético, magnetização, elementos traços.

**SUMMARY:** *MAGNETIZATION, TRACE ELEMENTS AND LITHOLOGY IN TWO SOIL SEQUENCES FROM MINAS GERAIS STATE, BRAZIL*

*The correlations and, in some cases, regressions between magnetization and total contents of Fe, Cu, Mn, Ti, Co and Zn were analyzed in two sets of soil samples. The lithology varied with the degree of influence of tuffite and pelitic rocks of the Bambuí Group (sequence AP, from the physiographic region of Alto Paranaíba), and of basalt and sandstone (sequence TM, from the Triângulo Mineiro region). The spontaneous magnetization ( $\sigma$ ) was found to be correlated with the relative influence of mafic rocks (basalt or tuffite) on parent material. Significant and positive correlation coefficients were found between  $\sigma$  and trace element content in the fine earth*

(1) Parte da tese de mestrado do primeiro autor apresentada ao Departamento de Química da Universidade Federal de Viçosa, realizada com apoio financeiro do CNPq, da FAPEMIG e da Comissão das Comunidades Européias (contrato ISC-CT90-0856). Recebido para publicação em novembro de 1992 e aprovado em abril de 1994.

(2) Professora Assistente, Departamento de Química, Universidade Federal do Espírito Santo, Av. Fernando Ferrari s/n, Campus, Goiabeiras, CEP 29060-900 Vitória (ES).

(3) Pesquisador III, CNPMS/EMBRAPA, Caixa Postal 151, CEP 35701-970 Sete Lagoas (MG). Bolsista do CNPq.

(4) Professor Adjunto, Departamento de Física, Universidade Federal do Espírito Santo, Av. Fernando Ferrari s/n, Campus, Goiabeiras, CEP 29060-900 Vitória (ES).

(5) Professor Titular, Departamento de Ciência do Solo, ESAL, Caixa Postal 37, CEP 37200-000 Lavras (MG).

(6) Professor, Department of Pure and Applied Physics, Trinity College, University of Dublin, Dublin 2, Ireland.

*fraction of all samples. However, the contribution of each particle size fraction to the global correlation was distinct in each sequence. In the AP sequence, fine fraction (clay) clearly contributed more than the sand only for Cu and Ti, while sand fraction gives higher correlation in the TM sequence for all analyzed elements.*

*Index terms: magnetic soil, magnetization, trace elements.*

## INTRODUÇÃO

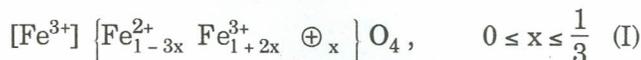
Os solos magnéticos (aqueles cuja magnetização excede  $1 \text{ JT}^{-1}\text{kg}^{-1}$  (Coey, 1988)), são de particular importância nas faixas tropical e subtropical do Globo. No Brasil, esses solos (a): ocupam uma área significativa do território, estimada em cerca de 5% da sua superfície (Resende et al., 1986a) e (b): na maioria dos casos, são de grande importância econômica para a agricultura, em virtude de suas altas aptidões agrícolas.

A diferenciação dos solos magnéticos no campo é, de modo geral, feita com o auxílio de um pequeno ímã de mão. Esse critério tem sido adotado para identificar solos desenvolvidos de rochas máficas (Comissão de Solos, 1960). De outro modo, não é simples separar, no campo, um latossolo vermelho-escuro (muito baixa magnetização), por exemplo, de um latossolo roxo (alta magnetização), pelas características morfológicas convencionais, como cor, textura e estrutura.

A magnetização espontânea ( $\sigma$ , daqui por diante, simplesmente, magnetização, é dada pela magnetização de saturação extrapolada para campo externo nulo) se relaciona com a proporção de ferrimagnéticos nos solos, representados, essencialmente, pelos óxidos de ferro com estrutura de espinélio. A suscetibilidade magnética (razão entre a magnetização e o campo magnético aplicado) pode, eventualmente, representar uma medida consistente da magnetização, em campos magnéticos acima de 0,3 tesla, condição em que se aproxima do valor de saturação (Coey, 1988).

Os solos da região tropical são tipicamente mais sujeitos a altas taxas de intemperismo e lixiviação e tendem a concentrar residualmente os óxidos (termo que aqui inclui óxidos, oxi-hidróxidos e hidróxidos). Os óxidos de ferro são os que efetivamente respondem pela magnetização da amostra, especialmente os ferrimagneticamente ordenados, como magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , magnetização espontânea,  $\sigma \approx 90 \text{ JT}^{-1}\text{kg}^{-1}$ ) e maguemita ( $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $20 < \sigma < 60 \text{ JT}^{-1}\text{kg}^{-1}$ ). A hematita ( $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $0,2 < \sigma < 0,5 \text{ JT}^{-1}\text{kg}^{-1}$ ) contribui relativamente pouco, diante dos dois primeiros, enquanto a goethita ( $\alpha\text{FeOOH}$ ), a ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ) e os silicatos com ferro estrutural não são magneticamente ordenados à temperatura ambiente (Coey, 1988, Coey et al., 1992).

A maguemita tem a estrutura não estequiométrica do espinélio, pois não existem  $\text{Fe}^{3+}$  suficientes para preenchimento de todos os sítios tetraédricos {A} e octaédricos {B}. A estequiometria ideal corresponde a  $x = 1/3$  na série substitucional magnetita - maguemita,



onde  $\oplus$  representa um buraco catiônico. A célula unitária tem  $2\frac{1}{3}$  átomos de  $\text{Fe}(\text{III})$  e  $2\frac{1}{3}$  buracos, distribuídos entre 8 sítios tetraedrais e 16 octaedrais (Murad & Johnston, 1987; Coey, 1988). O alinhamento antiparalelo dos *spins* com populações desiguais nos subdomínios A e B conferem o caráter ferrimagnético ao óxido. A magnetita tem estrutura invertida do espinélio. Estequiometricamente, equivale à condição em que  $x = 0$ , na fórmula (I). A estrutura magnética é similar à da maguemita, mas os valores esperados de magnetização são bem distintos. Na prática, registram-se valores menores do que os esperados para os óxidos puros, em ambos os casos, em virtude da presença de íons hidroxilas estruturais ou íons não-magnéticos isomorficamente substituintes (Coey, 1988).

Há evidências de que esses minerais responsáveis pela atividade magnética nesses solos sejam também reservatórios de elementos traços (Curi, 1983; Curi & Franzmeier, 1987). Alguns deles são essenciais para o metabolismo vegetal, ainda que em pequenas quantidades (Camargo, 1988). A afinidade de alguns elementos traços por certas estruturas minerais é há muito conhecida. O estudo comparativo da composição química de uma série de minerais revela que a magnetita retém cerca de 4 vezes mais, no conjunto, Mn, Cr, V, Ni, Co, Cu e Zn do que, por exemplo, a augita ou a olivina e algo como 25 vezes mais do que a hematita ou a goethita (Nalovic & Segalen, 1973).

O propósito do presente estudo foi verificar as relações quantitativas entre a magnetização, que reflete a litologia, nos pedodomínios escolhidos, e os teores totais de elementos traços, em duas seqüências de solos do Estado de Minas Gerais, com influência variável de (a) tufito, na região do Alto Paranaíba, e (b) de basalto, no Triângulo Mineiro.

## MATERIAL E MÉTODOS

Geologicamente, a região fisiográfica do Alto Paranaíba tem um embasamento de rochas pelíticas do pré-cambriano, que são inclinadas e cobertas por sedimentos fluviolacustres afetados por material piroclástico (Schobbenhaus et al., 1984, Guimarães, 1955). Apresenta-se na forma de grandes chapadões muito bem expressos, localmente bastante recortados, originando vales profundos, com encostas bastante largas (sedimentos recortados pela erosão).

Nos chapadões, predominam o latossolo variação uma distrófico (LUd) e o latossolo vermelho-escuro distrófico (LEd) em litologia de rochas pelíticas. Nas áreas de relevo mais acidentado, ocorre principalmente latossolo roxo distrófico (LRd) desenvolvido de tufito, e, menos freqüentemente, cambissolo distrófico (Cd), desenvolvido de rochas pelíticas do Grupo Bambuí (Carmo et al., 1984). Os locais de amostragem da série AP que acompanharam sistematicamente a litologia da área, estão representados na figura 1a.

A região do Triângulo Mineiro situa-se nas bacias dos rios Paranaíba e Grande. Geomorfologicamente, é formada de planaltos do mesozóico, com litologia de arenito e basalto. Seus solos predominantes são latossolo vermelho-amarelo, latossolo vermelho-escuro e latossolo roxo. O latossolo vermelho-escuro (LEd) e o latossolo vermelho-amarelo (LVd), ambos distróficos e de texturas argilosas, ocorrem nas chapadas localizadas em cotas superiores a 800 m e são litologicamente correlacionados com rochas da Série Araxá, Canastra e, possivelmente, capeamento argiloso do Bauru Superior (Barbosa et al., 1970). O latossolo vermelho-escuro distrófico, textura média (LEd), ocorre nas superfícies suave-ondulada e ondulada, com cotas variando de 300 m a 800 m de altitude, em litologia da Série Bauru (Barbosa, 1970). O latossolo

roxo distrófico (LRd) e o latossolo roxo eutrófico (LRe) surgem ao longo dos rios principais, litologicamente associados ao basalto.

Os locais de coleta das amostras TM encontram-se na figura 1b.

As identificações dos solos, localização e classificação das duas seqüências estão resumidamente descritas no quadro 1.

A seleção dos locais de amostragem foi feita com base na atração da massa do solo por um pequeno ímã de mão, como critério qualitativo da influência da rocha máfica. Em cada local, coletou-se uma amostra do horizonte B, sendo as do horizonte Bw (latossolos) coletadas em profundidades de 70 a 140 cm e as do Bi (cambissolo) de 40 a 70 cm.

As amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas manualmente e passadas em peneira de 2mm, para a obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA), e caracterizadas, para fins de classificação do solo (Quadro 2), pelos procedimentos convencionais de laboratório (EMBRAPA, 1979). A fração argila foi separada pelo método descrito por Vettori (1969), sendo o agente dispersante NaOH 6% substituído por solução de NH<sub>4</sub>OH (1:1). Após dispersão em ultrassom, a suspensão (100 g de solo em 10 ml de NH<sub>4</sub>OH

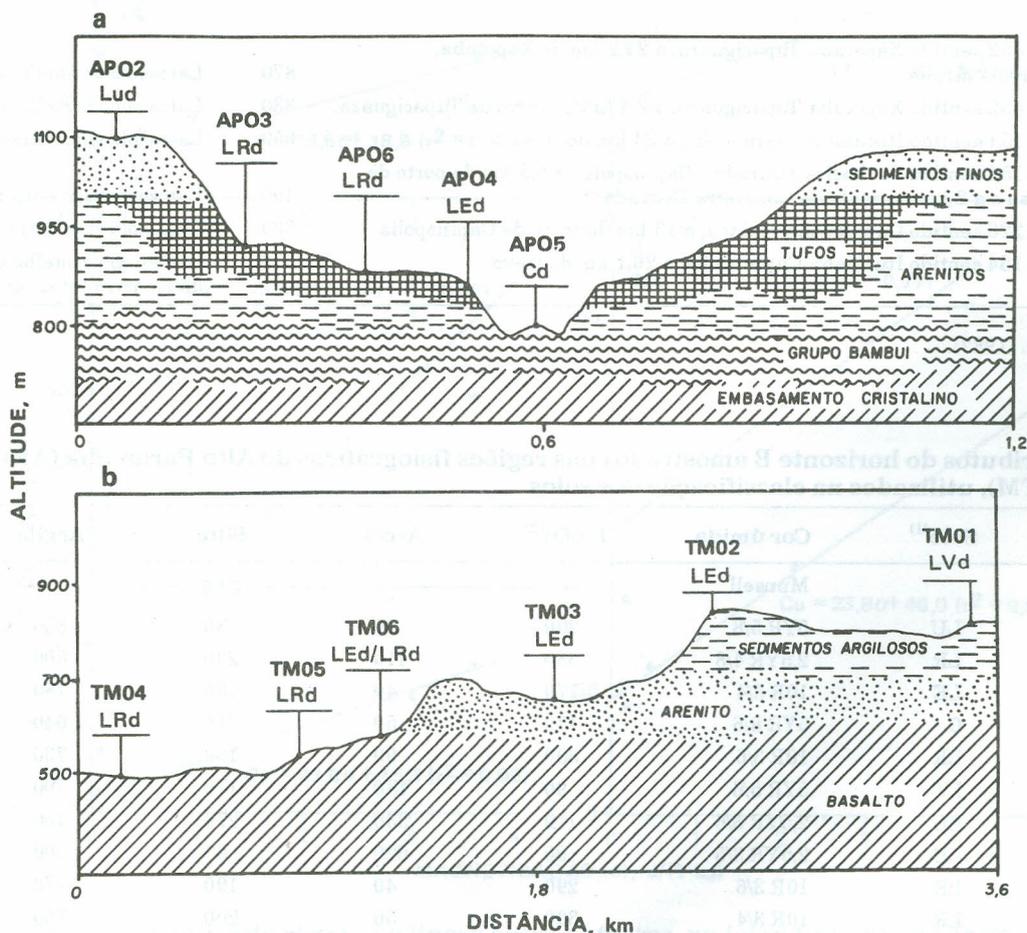


Figura 1. Representação esquemática (escala aproximada) da litologia e localização das seqüências do Alto Paranaíba (adaptada de Carmo et al., 1984) (a) e do Triângulo Mineiro (adaptada de Resende, 1976) (b).

e 300 ml de água) foi transferida para proveta de 1.000 ml e o volume, completado com água desionizada. A suspensão foi deixada decantar durante quatro horas, procedendo-se à sifonação do volume superior, até 5 cm de profundidade. Após sucessivas retiradas, a argila foi seca ao ar e o resíduo, peneirado em 0,053 mm com água corrente, para separação da areia.

A mineralogia da fração argila foi avaliada por difração de raios X - DRX (radiação  $\text{CuK}\alpha$ ) - em amostras saturadas com  $\text{Na}^+$ , pelo método do pó. Os óxidos de ferro, após tratamento da fração argila com

$\text{NaOH}$  5M (Norrish & Taylor, 1961; Kämpf & Schwertmann, 1982) foram analisados por DRX, considerando-se que para sua quantificação, além das áreas dos reflexos desses minerais, o teor de  $\text{Fe}_d$  (Kämpf & Schwertmann, 1983).

A proporção de óxidos de ferro livres ( $\text{Fe}_d$ ) nas amostras da fração argila foi obtida por duas extrações sucessivas com ditionito - citrato - bicarbonato de sódio, segundo método de Mehra & Jackson (1960), e a dosagem do Fe foi realizada por espectrofotometria de absorção atômica. Todas as frações foram quimicamente analisadas, com três repetições, por

**Quadro 1. Identificação, localização e classificação dos solos do Alto Paranaíba (AP) e do Triângulo Mineiro (TM)**

Amostra	Local de coleta das amostras	Altitude	Classificação <sup>(1)</sup>
		m	
AP02	BR 354, km 85, sentido Patos de Minas - São Gotardo	1100	Latossolo variação una (LUd)
AP03	BR 354 sentido Patos de Minas - São Gotardo, a 10,3 km do trevo (km 16)	905	Latossolo roxo (LRd)
AP04	BR 354 sentido Patos de Minas - São Gotardo, a 2,5 km do trevo, na margem direita	840	Latossolo vermelho-escuro (LEd)
AP05	BR 354 sentido Patos de Minas - São Gotardo, a 1,5 km do trevo, na margem direita	800	Cambissolo (Cd)
AP06	BR 354 sentido Patos de Minas - São Gotardo, a 18,1 km do trevo.	860	Latossolo roxo (LRd)
TM01	BR 452 sentido Xapetuba-Tupaciguara, a 21,2 km de Xapetuba, margem direita	870	Latossolo vermelho-amarelo (LVd)
TM02	BR 452 sentido Xapetuba-Tupaciguara, a 2,4 km do trevo de Tupaciguara.	830	Latossolo vermelho-escuro (LEd)
TM03	BR 154 sentido Ituiutaba-Capinópolis, a 24 km do trevo	650	Latossolo vermelho-escuro (LEd)
TM04	BR 154 sentido Cachoeira Dourada - Capinópolis, a 5,5 km do porto da balsa e a 2 km da saída de Cachoeira Dourada	490	Latossolo roxo eutrófico (LRe)
TM05	BR 226 sentido Capinópolis - Ipiacu, a 13 km do trevo de Capinópolis	530	Latossolo roxo distrófico (LRd)
TM06	BR 154 sentido Ituiutaba-Capinópolis, a 26,1 km do trevo	570	Latossolo vermelho-escuro intermediário para latossolo roxo (LE/LR)

<sup>(1)</sup> Camargo et al. (1987).

**Quadro 2. Atributos do horizonte B amostrados nas regiões fisiográficas do Alto Paranaíba (AP) e Triângulo Mineiro (TM), utilizados na classificação dos solos**

Amostra	Solo <sup>(1)</sup>	Cor úmida	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ <sup>(2)</sup>	Areia	Silte	Argila	V <sup>(3)</sup>
		Munsell			g kg <sup>-1</sup>		
AP02	LU	5YR 5/8	200	20	130	850	30
AP03	LR	2,5YR 4/8	330	110	290	600	110
AP04	LE	10R 3/4	170	40	180	780	70
AP05	C	5YR 6/6	130	50	310	640	70
AP06	LR	10R 3/6	300	90	180	730	60
TM01	LV	5YR 5/6	90	130	170	700	90
TM02	LE	2,5YR 3/6	110	330	270	400	210
TM03	LE	2,5YR 3/6	90	620	80	300	200
TM04	LR	10R 3/6	290	40	190	770	510
TM05	LR	10R 3/4	300	50	200	750	170
TM06	LE	10R 3/4	170	420	80	500	500

<sup>(1)</sup> LU: latossolo variação una; LR: latossolo roxo; LE: latossolo vermelho-escuro; C: cambissolo; LV: latossolo vermelho-amarelo.

<sup>(2)</sup> Determinado pelo ataque sulfúrico. <sup>(3)</sup> Saturação por bases.

dissolução total com mistura de ácido sulfúrico + ácido fluorídrico (1:10), segundo Jeffery (1981), com algumas adaptações: uma quantidade entre 0,5 e 1,0 g de amostra seca foi transferida para cadinho de teflon com 10 ml de HNO<sub>3</sub> concentrado e aquecida em banho de areia até secagem. Foram adicionados 10 ml da solução H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-HF (1:10), sob aquecimento até fumos brancos (duas vezes). Adicionaram-se, em seguida, 10 ml de HF e, logo após, 10 ml de H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> (solução saturada), procedendo-se novamente à secagem. Finalmente, juntaram-se 10 ml de HCl (concentrado), com aquecimento. Filtrou-se e transferiu-se para balão volumétrico de 100 ml, completando-se o volume

com solução de HNO<sub>3</sub> 1%, para posterior determinação de Fe, Mn, Zn, Cu, Ti e Co por espectrofotometria de absorção atômica.

As medidas de magnetização foram obtidas com um magnetômetro portátil de campo magnético fixo de 0,3 tesla, especialmente desenvolvido para trabalhos no campo (Coe y et al., 1992).

Inicialmente, foram analisadas as correlações entre a magnetização e os teores de micronutrientes, independentemente, para todas as frações granulométricas. Os casos estatisticamente mais significativos, foram analisados por regressão linear.

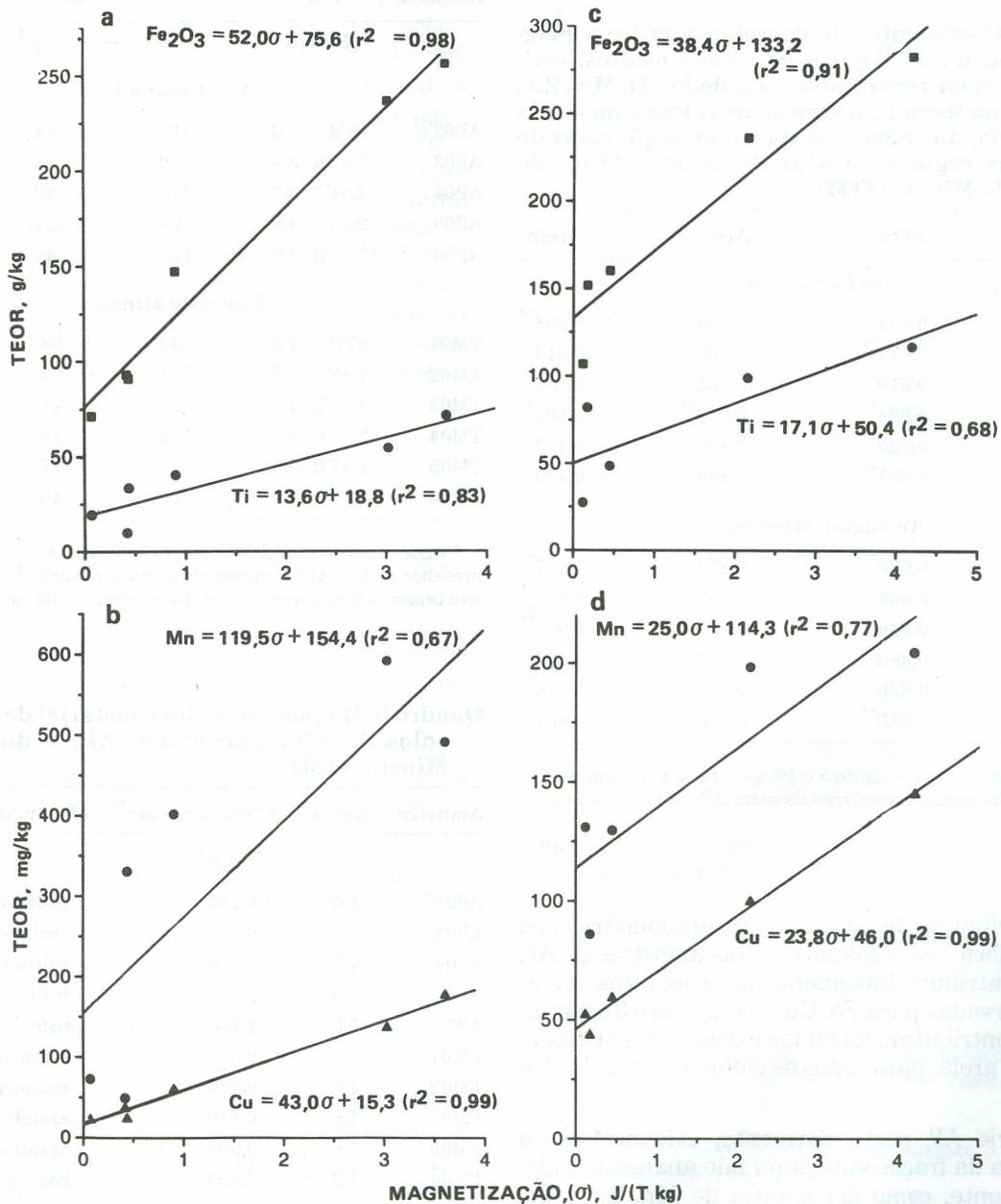


Figura 2. Análise de regressão linear entre os teores, na terra fina seca ao ar dos elementos indicados e a magnetização ( $\sigma$ ) das duas seqüências de solos estudadas (AP = Alto Paranaíba; TM = Triângulo Mineiro. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Ti, nas amostras TM (a); Mn e Cu, nas amostras TM (b); Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Ti, nas amostras AP (c) e Mn e Cu, nas amostras AP (d).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 2 apresenta a variação dos teores de  $Fe_2O_3$ , Ti, Mn e Cu em função da magnetização da TFSA, nas duas seqüências de solos estudadas. As funções lineares estimadas por análise de regressão foram mostradas em cada caso.

Em termos gerais, os coeficientes de correlação foram positivos e significativos para todos os elementos estudados na TFSA, observando-se, no entanto, coeficientes mais significativos (> 95%) para Fe e Cu (Quadro 3).

**Quadro 3. Coeficientes de correlação entre a magnetização ( $\sigma$ ,  $JT^{-1}kg^{-1}$ ) e os teores médios, estimados das três determinações, de Fe, Ti, Mn, Zn, Cu e Co na terra fina seca ao ar (TFSA), na argila e na areia, das amostras das duas seqüências de solos das regiões do Alto Paranaíba (AP) e do Triângulo Mineiro (TM)**

Elemento	TFSA	Argila	Areia
<b>Alto Paranaíba</b>			
Fe, %	0,952**	0,909**	0,808**
Mn, mg/kg	0,874**	0,401	-0,344
Zn, mg/kg	0,819**	-0,304	-0,181
Cu, mg/kg	0,994**	0,972**	0,604*
Co, mg/kg	0,720**	0,493	0,407
Ti, %	0,807**	0,846**	0,479
<b>Triângulo Mineiro</b>			
Fe, %	0,998**	0,273	0,977**
Mn, mg/kg	0,866**	0,222	0,811**
Zn, mg/kg	0,946**	0,267	0,965**
Cu, mg/kg	0,986**	-0,097	0,975**
Co, mg/kg	0,886**	0,382	0,746**
Ti, %	0,938**	-0,106	0,867**

\* e \*\* Significativos aos níveis de 5 e 1% pelo teste t. Foram usados 5 pares de dados para as amostras da série AP e 6 para as da TM.

A contribuição de cada fração granulométrica, no entanto, diferiu nas duas séries. Nas amostras da AP, a argila contribuiu fortemente para as altas correlações observadas para Fe, Cu e Ti (Quadro 3); nas da TM, essa contribuição foi quase exclusivamente dada pela fração areia, para todos os elementos analisados (Quadro 3).

Na série AP, particularmente, evidenciou-se a importância da fração silte, aqui não analisada independentemente, como depositária de Mn, Zn e Co, pois houve altas correlações na TFSA e baixas nas frações areia e argila.

A análise mineralógica baseada unicamente na difração de raios X revela que caulinita, gibbsita e goethita estão presentes na fração argila de todas as

amostras (Ferreira, 1991). Os latossolos roxos (AP03, AP06, TM04 e TM05) concentram quantidades relativamente maiores de hematita (Quadro 4), que chegou a 80% do total de óxidos de ferro da fração argila. Essas quatro amostras são também as mais magnéticas (Quadro 5). A magnetização de solos desenvolvidos

**Quadro 4. Cores úmidas, teores de ferro, obtido por extração com DCB ( $Fe_d$ ), de goethita (Gt) e de hematita (Hm), na fração argila de amostras das duas seqüências de solos das regiões do Alto Paranaíba (AP) e do Triângulo Mineiro (TM)**

Amostra	Cor		$Fe_d$	Gt(110)	Hm(012)
	Munsell				
g $kg^{-1}$					
<b>Alto Paranaíba</b>					
AP02 <sup>(1)</sup>	5YR	4/6	116	184	-
AP03	2,5YR	3/4	190	33	242
AP04	2,5YR	3/6	118	92	86
AP05	2,5YR	4/6	104	124	37
AP06	2,5YR	3/6	179	46	214
<b>Triângulo Mineiro</b>					
TM01	5YR	4/6	43	68	-
TM02	2,5YR	4/6	101	56	94
TM03	2,5YR	4/6	122	49	130
TM04	2,5YR	3/6	149	19	196
TM05	2,5YR	3/6	151	17	200
TM06	2,5YR	4/6	146	49	164

<sup>(1)</sup> A razão da intensidade dos picos (130)/(111) igual a 0,63 sugere a presença de hematita, apesar de os picos diagnósticos (012) e (110) não terem sido observados nos difratogramas de raios X.

**Quadro 5. Magnetização ( $\sigma$ ) e material de origem nos solos do Alto Paranaíba (AP) e do Triângulo Mineiro (TM)**

Amostra	Solos	Magnetização <sup>(1)</sup>		Material de origem <sup>(2)</sup>
		$JT^{-1}kg^{-1}$		
AP05	Cd	0,120		pelíticas
AP02	LU	0,175		sedimentos finos
AP04	LE	0,450		pelíticas/tufo
AP06	LR	2,160		tufo
AP03	LR	4,200		tufo
TM01	LV	0,070		sedimentos argilosos
TM02	LE	0,420		sedimentos argilosos
TM03	LE	0,440		arenito
TM06	LE	0,905		arenito/basalto
TM04	LR	3,030		basalto
TM05	LR	3,610		basalto

<sup>(1)</sup> Medida por Coey et al. (1992), usando VSM ("Vibrating Sample Magnetometer"). <sup>(2)</sup> Sentido do aumento da influência da rocha máfica; tufo na série AP: AP05 > AP02 > AP04 > AP06 > AP03 e basalto na série TM: TM01 > TM02 > TM03 > TM06 > TM04 > TM05.

de basalto é essencialmente devida à presença de Ti-maguemita herdada da rocha (Coey et al., 1991), enquanto nos de tufito o principal mineral magnético é a Mg-maguemita (Fabris et al.)<sup>(7)</sup>. A natureza lacunar dos óxidos de ferro no gradiente de série substitucional, sobretudo da magnetita-maguemita, é tida como característica que favorece a acomodação de alguns elementos traços na rede cristalina. Essa propriedade pode, assim, explicar as correlações verificadas, entre a magnetização e os teores totais de elementos traços, de forma similar às reportadas por Curi & Franzmeier (1987) e Resende et al. (1986b).

O processo de difusão dos elementos traços da estrutura dos óxidos para a solução do solo não é totalmente claro. Sabe-se, no entanto, que a transformação magnetita → maguemita → hematita acompanha o processo de intemperismo no solo. No primeiro estágio dessa transformação, envolvendo a oxidação  $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ , a estrutura cúbica da magnetita é preservada, até pelo menos 13,6% de  $Fe^{2+}$ , com a ejeção de 11% de  $Fe^{2+}$  da estrutura e a consequente criação de buracos catiônicos (Schwertmann & Cornell, 1991). Essas alterações são seguidas de contração da rede cristalina (Sidhu et al., 1977) e de migração de elementos traços para a superfície da hematita (Sidhu et al., 1980). Esse modelo poderia explicar a maior disponibilidade de elementos traços, que contribui para o maior potencial agrícola dos solos magnéticos.

### CONCLUSÕES

1. Verificaram-se correlações positivas significativas entre a magnetização espontânea da TFSA do material de solo estudado, medida em campo magnético da ordem de 0,3 tesla, e teores totais de Fe, Cu, Mn, Ti, Zn e Co na TFSA, com as maiores correlações para Fe e Cu.

2. A magnetização deu boa indicação da litologia, sendo significativamente maior quanto maior foi a influência de tufito e basalto no material de origem.

3. As medidas de magnetização do solo constituíram, assim, um critério útil de estimativa da sua riqueza relativa em alguns micronutrientes (Fe, Mn, Zn e Cu).

### AGRADECIMENTOS

Aos Professores Antônio T. Goulart (Dep. Química, UFV) e Milton F. Jesus Filho (Dep. Química, UFMG), pela rica discussão em torno da mineralogia dos solos estudados; ao Dr. Antônio C. de Oliveira (CNPMS/EMBRAPA), pela ajuda nas análises es-

tatísticas dos resultados; ao Dr. O. Cugat (Dept. Pure and Applied Physics, University of Dublin, TCD, Dublin, Ireland) pela elaboração das figuras, e ao técnico Carlos H. P. Pires (CNPMS), pelo apoio nos procedimentos analíticos de laboratório.

### LITERATURA CITADA

- BARBOSA, O.; BRAUN, O. P. G.; DYER, R. C. & CUNHA, C. A. B. R. Geologia da Região do Triângulo Mineiro. Rio de Janeiro, Departamento Nacional da Produção Mineral, 1970. 140p. (Boletim, 136)
- CAMARGO, O. A. Micronutrientes no solo. In: BORKERT, C. M. & LANTMANN, A. F., eds. Enxofre e micronutrientes na agricultura brasileira. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 17., Resumos, Londrina, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1988. p 103-120.
- CAMARGO, M. N.; KLANT, E. & KAUFFMAN, J. H. Classificação de solos usada em levantamentos pedológicos no Brasil. B. Inf. da SBCS, Campinas, 12(1):11-33, 1987.
- CARMO, D.; CURI, N. & RESENDE, M. Caracterização e gênese de latossolos de região do Alto Paranaíba (MG). R. bras. Ci. Solo, 8:235-240, 1984.
- COEY, J. M. D. Magnetic properties of soil iron oxides and clay minerals. In: STUCKLI, J. W.; GOODMAN, B. A. & SCHWERTMANN, U., eds. Iron in Soils and Clay Minerals. Dordrecht, Reidel Publishing, 1988. p.397-466.
- COEY, J. M. D.; FABRIS, J. D. & RESENDE, M. <sup>57</sup>Fe Mössbauer studies of oxisols. Hyperfine Int., Basel, 66:51-62, 1991.
- COEY, J. M. D.; CUGAT, O.; McCAULEY, J. & FABRIS, J. D. A portable soil magnetometer. R. Fis. Apl. Instr., São Paulo, 7:25-30, 1992.
- COMISSÃO DE SOLOS. Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de São Paulo. Rio de Janeiro, Serviço Nacional de Pesquisa Agropecuária - MA, 1960. (Boletim Técnico, 12)
- CURI, N. Lithosequence and toposequence of oxisols from Goiás and Minas Gerais States, Brazil. West Lafayette, Purdue University, 1983. 158p. (Tese de Doutorado)
- CURI, N. & FRANZMEIER, D. P. Effect of parent rocks on chemical and mineralogical properties of some oxisols in Brazil. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, 51:153-158, 1987.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 1979.
- FERREIRA, S. A. D. Relação entre magnetismo e teores de elementos traços em solos de duas regiões de Minas Gerais. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1991. 94p. (Tese de Mestrado.)
- GUIMARÃES, D. Contribuição ao estudo dos tufos vulcânicos da Mata da Corda. Belo Horizonte, Instituto Técnico Industrial, 1955. 27p. (Boletim, 18)
- JEFFERY, P. G. Chemical methods of rock analysis. 3. ed., London, Pergamon Press, 1981. 375p.
- KÄMPF, N. & SCHWERTMANN, U. The 5-M-NaOH concentration treatment for iron oxides in soils. Clays Clay Miner., Evergreen, 30:401-408, 1982.
- KÄMPF, N. & SCHWERTMANN, U. Relações entre óxidos de ferro e cor em solos caulínicos do Rio Grande do Sul. R. bras. Ci. Solo, Campinas, 7:27-31, 1983.

<sup>(7)</sup> FABRIS, J. D.; COEY, J. M. D.; JESUS FILHO, M. F.; SANTANA, D. P. GOULART, A. T. FONTES, M. F. & CURI, N. Mineralogical analysis of a weathering mantle derived from tuffite. Hyperfine Int., Basel, 1994. (No prelo.)

- MEHRA, O. P. & JACKSON, M. C. Iron oxide removal from soil and clay by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In: NATIONAL CONFERENCE ON CLAY MINERALS, 7., Anais. New York, Pergamon Press, 1960. p.317-327.
- MURAD, E. & JOHNSTON, J. H. Iron oxides and oxyhydroxides. In: LONG, G. J., ed. Mössbauer spectroscopy applied to inorganic chemistry. New York, Plenum Press, 1987. v.2, 626p.
- NALOVIC, L. & SEGALEN, P. Relations entre le fer et les elements traces de transition dans un certain nombre de minéraux ferifères. Cah. ORSTOM, Série Pedologie XI(2):181-191, 1973.
- NORRISH, K. & TAYLOR, R.M. The isomorphous replacement of iron by aluminium in soil goethites. J. Soil Sci., London, 12:294-306, 1961.
- RESENDE, M. Mineralogy, chemistry, morphology and geomorphology of some soils of the Central Plateau of Brazil. PhD thesis, West Lafayette, Purdue University, 1976. 237p. (Tese de Doutorado.)
- RESENDE, M.; ALLAN, J. & COEY, J. M. D. The magnetic soils of Brazil. Earth Planet. Sci. Lett., Amsterdam, 78:322-326, 1986a.
- RESENDE, M.; SANTANA, D. P.; FRANZMEIER, D. P. & COEY, J. M. D. Magnetic properties of Brazilian Oxisols. In: CAMARGO, M. N. & BEINROTH, F. H., eds. INTERNATIONAL SOIL CLASSIFICATION WORKSHOP, 8., Rio de Janeiro/Brasília, EMBRAPA-SNLCS and USDA-SCS/SMSS, 8., 1986b. p.78-108.
- SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D. de A.; DERZE, G. R. & ASMUS, H. E. Formação Mata da Corda (Kmc). In: SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D. de A.; DERZE, G. R. & ASMUS, H. E. Geologia do Brasil: texto explicativo do mapa geológico do Brasil e da área oceânica adjacente incluindo depósitos minerais. Brasília, Ministério das Minas e Energia/DNPM, 1984. p.240.
- SCHWERTMANN, U. & CORNELL, R. M. Iron oxides in the laboratory (preparation and characterization). Weinheim, VCH Verlagsgesellschaft, 1991. 137p.
- SIDHU, P. S.; GILKES, R. J. & POSNER, A. M. Mechanism of the low temperature oxidation of synthetic magnetites. J. Inorg. Nucl. Chem., 39:1953-1958, 1977.
- SIDHU, P. S.; GILKES, R. J. & POSNER, A. M. The behavior of Co, Ni, Zn, Mn, and Cr in magnetite during alteration to maghemite and hematite. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, 44:135-138. 1980.
- VETTORI, L. Métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, EDFS, Ministério da Agricultura, 1969. 24p. (Boletim Técnico, 7.)