

Determinação indireta do teor de hematita no solo a partir de dados de colorimetria e radiometria⁽¹⁾

Rogério Costa Campos⁽²⁾, José Alexandre M. Demattê⁽³⁾ e Carlos Fernando Quartaroli⁽³⁾

Resumo – A cor do solo é uma propriedade que deriva de alguns atributos do próprio solo, entre eles, do teor de óxidos de ferro. Desse modo, o estabelecimento de relações funcionais entre dados referentes à caracterização da cor e teores de óxidos de ferro apresenta-se como uma alternativa simples e rápida para a semiquantificação dos teores dos referidos óxidos. O objetivo do presente trabalho foi semiquantificar os teores de hematita na fração argila, em laboratório, a partir da avaliação automatizada das cores de amostras de solos do Estado de São Paulo, utilizando um colorímetro e um espectrorradiômetro. Os dados obtidos por radiometria serviram de base para a determinação da cor nos sistemas L*a*b* e Munsell, bem como para o cálculo de índices de avermelhamento (IAVs). Os IAVs apresentaram dependência funcional dos teores de hematita e foram as melhores relações verificadas com os índices determinados a partir de cores no sistema L*a*b*. Modelos exponenciais, baseados em dados obtidos por sensores, mostram-se adequados na predição dos teores de hematita.

Termos para indexação: óxido de ferro, cor, reflectância, sensoriamento remoto.

Indirect determination of hematite content in soil from colorimetric and radiometric data

Abstract – The soil color is a property that derives from some soil attributes, among them, the iron oxides content. So, the establishment of functional relationships between data related to soil color characterization and iron oxides content consists on a very useful procedure for the semiquantitative determination of the soil iron oxides contents. The present research aimed at estimating the hematite content clay fraction, in laboratory, from data related to soil color obtained by using automatic devices. Soil samples from São Paulo State, Brazil, had their clay fraction hematite contents semiquantitatively determined by the association of chemical and physical methods and their colors evaluated in laboratory through measurements made with a colorimeter and a spectroradiometer. The radiometric data were used to the determination of soil color in L*a*b* and Munsell systems and to the calculation of reddish indexes (RI). The RI values showed functional dependence of hematite contents and the best relation was verified with RI values derived from color determined in the L*a*b* system. Exponential models, developed from remote sensors, show themselves adequate in predicting the soil hematite contents.

Index terms: iron oxide, colour, reflectance, remote sensing.

Introdução

O sensoriamento remoto vem sendo utilizado em estudos relacionados às ciências ambientais, à pedologia e em estudos de coberturas vegetais.

Exemplos da aplicação do sensoriamento remoto na ciência do solo podem ser verificados em alguns trabalhos, como os de Madeira Netto et al. (1997), Galvão & Vitorelo (1998) e Demattê & Garcia (1999).

A cor dos solos é uma propriedade pedológica passível de caracterização via sensoriamento remoto e mostra relação com a natureza e o teor dos óxidos de ferro, compostos que exercem grande influência na reflectância espectral dos solos (Formaggio et al., 1996). Conseqüentemente, o avermelhamento provocado pela presença da hematita em solos tem levado pesquisadores a propor índices de

⁽¹⁾ Aceito para publicação em 16 de dezembro de 2002.

⁽²⁾ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Av. dos Astronautas, 1758, Jardim Granja, CEP 12227-010 São José dos Campos, SP. Bolsista do CNPq. E-mail: rogerio@ltid.inpe.br

⁽³⁾ Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Dep. de Solos e Nutrição de Plantas, Av. Pádua Dias, 11, CEP 13418-900 Piracicaba, SP. E-mail: jamdemat@esalq.usp.br, cfquarta@esalq.usp.br

avermelhamento que permitam a estimativa do conteúdo desse mineral (Barrón & Torrent, 1986). Esses índices são baseados em coordenadas de sistemas de notação de cores, como o sistema Munsell e os espaços de cores propostos pela CIE (Commission Internationale de l'Éclairage, 1931), como o Y_{xy} e o $L^*a^*b^*$, estabelecidos em 1976 (McLaren, 1976).

Apesar da pouca expressão nos estudos com solos, o sistema $L^*a^*b^*$ é utilizado por mais de 90% dos usuários de diversas áreas (Sánchez-Marañón et al., 1995). Por sua vez, o sistema Munsell é o mais conhecido entre os pedólogos e presença certa nas cadernetas de campo de avaliação da cor do solo.

Os sistemas propostos pela CIE são baseados na teoria dos três componentes da visão colorida, pela qual o olho possui receptores para as três cores primárias (vermelho, verde, azul) e todas as outras cores são vistas como uma mistura dessas cores. A notação de cores nesses sistemas tem por base os valores de triestímulos, que correspondem ao produto da distribuição espectral de potência do iluminante pela reflectância espectral do objeto e pela resposta do olho humano às três cores primárias.

O sistema Munsell é definido em termos dos valores de matiz, valor (brilho) e croma (saturação). A determinação das cores nesse sistema normalmente é feita por comparação visual com uma série de padrões contidos na carta de Munsell.

Por sua vez, a determinação da cor do solo pelo método proposto por Barrón & Torrent (1986), que se baseia no cálculo de valores de triestímulos, é feita com pequenas quantidades de amostras secas e o uso de equipamentos nas avaliações. Os valores obtidos com esta técnica apresentam maior precisão, uma vez que se evitam interpolações imprecisas, falta de reprodutibilidade e erros subjetivos, passíveis de ocorrer na determinação visual (Campos, 2002).

Rezende (1980) já apontava a técnica espectrofotométrica como promissora para estimar a relação hematita/goethita em amostras de solo, uma vez que observou comportamento diferenciado dos espectros obtidos decorrente da referida relação para solos brasileiros. Uma feição característica da curva espectral, caracterizada por um pico de absorção em torno de 440 a 460 nm, foi

identificada e relacionada com o aumento de goethita na amostra, embora o autor tenha encontrado dificuldade em mensurá-la.

Embora a cor dos óxidos seja conhecida, ocorrem fatores que podem afetar sua expressão, e variações são observadas, com implicações diretas na cor do solo. Torrent & Schwertmann (1987) observaram, para misturas de hematitas sintéticas e caulinitas, que a cor dependia do tamanho da partícula do óxido de ferro e que o aumento deste tamanho resultava em cores mais púrpuras, o que denota diminuição da capacidade de pigmentação da hematita. Essa relação, entretanto, não foi observada em amostras naturais de sedimentos vermelhos (red beds).

Apesar de Barrón & Torrent (1986) e Madeira Netto et al. (1997) relacionarem teores de hematita com dados de sensoriamento remoto, a determinação continua sendo feita por meio de análises de laboratório utilizando métodos convencionais, que são complexos, demorados, caros e não disponíveis em análises rotineiras. O sensoriamento remoto, cujo potencial no estudo do solo é comprovado, poderia auxiliar.

A estimativa dos teores de óxidos de Fe na fração argila de amostras de solos requer a separação da referida fração, a determinação química dos teores de Fe associados aos óxidos cristalinos e mal cristalizados nela presentes, bem como informações relacionadas à proporção entre os teores de hematita e goethita na argila e à substituição de Fe por Al na estrutura dos óxidos de ferro. Essas informações, por sua vez, são obtidas por processos laboriosos que envolvem a concentração dos óxidos de Fe e a realização de análises por difratometria de raios-X (Resende et al., 1987; Netto, 1996). Assim, o desenvolvimento de técnicas mais simples, menos onerosas e mais rápidas para a estimativa dos teores de óxidos de Fe dos solos é extremamente desejável.

O objetivo deste trabalho foi semiquantificar os teores de hematita na fração argila, em laboratório, a partir da avaliação automatizada das cores de amostras de solos do Estado de São Paulo, utilizando um colorímetro e um espectrorradiômetro.

Material e Métodos

Foram utilizadas 15 amostras de solos de diferentes localidades do Estado de São Paulo (Tabela 1), as quais tiveram os teores de hematita de suas frações argila semiquantificados por meio do método da alocação (Resende et al., 1987; Netto, 1996). Tal método se fundamenta na divisão do teor total de Fe associado aos óxidos de Fe cristalinos da fração argila em teores referentes aos minerais hematita e goethita, possibilitando, assim, a semiquantificação desses teores.

A aquisição dos dados espectrais das amostras de solo, secas e peneiradas em tamis de 2 mm, foi realizada com o sensor do espectrorradiômetro Fieldspec, que coleta dados espectrais no intervalo de 350 a 2.500 nm tomando dez medidas por segundo. Os dados foram coletados na faixa de 380 e 780 nm com resolução espectral de 1 nm. Como fonte de iluminação, foi utilizada uma lâmpada halógena de 650 W, com feixe não colimado para o plano visado. Como padrão de referência, foi utilizada uma placa de sulfato de bário. A razão entre o fluxo radiante espectral refletido pela superfície de uma amostra de solo e o fluxo radiante espectral refletido por um padrão de referência iluminados e visados sob as mesmas condições geométricas, gerou o fator de reflectância.

As cores das amostras de solo foram determinadas em amostras secas, por dois métodos: colorímetro e a partir dos dados de reflectância espectral das amostras. Na determinação por colorimetria, utilizou-se o aparelho Minolta, modelo CR 300, com capacidade de leitura em diferentes sistemas de cores, dos quais foram utilizados o sistema Munsell e o sistema $L^*a^*b^*$ definido pela CIE em

1976. No sistema $L^*a^*b^*$, as cores são definidas pelo brilho (L^*) e pelas coordenadas de cromaticidade (a^* e b^*), em que valores positivos de a^* estão relacionados à cor vermelha, valores negativos de a^* , à cor verde, valores positivos de b^* , à cor amarela e valores negativos de b^* , à cor azul. Como a notação das cores no sistema $L^*a^*b^*$ varia com o ângulo de visão do observador e a fonte de iluminação usada, o colorímetro foi programado para executar leituras considerando o observador padrão (Commission Internationale de l'Éclairage, 1931), com campo de visão de 2° e o iluminante C, também padronizado pela CIE.

Na determinação das cores pelos dados de reflectância espectral, foram determinados inicialmente os valores de triestímulos XYZ definidos pela CIE (Commission Internationale de l'Éclairage, 1931), com campo de visão de 2° . As equações utilizadas foram as seguintes:

$$X = K \int_{380}^{780} S(\lambda)R(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda, \quad (1)$$

$$Y = K \int_{380}^{780} S(\lambda)R(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda, \quad (2)$$

$$Z = K \int_{380}^{780} S(\lambda)R(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda, \quad (3)$$

$$K = \frac{100}{\int_{380}^{780} S(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda}, \quad (4)$$

em que: λ é o comprimento de onda da radiação em nm; $S(\lambda)$ é a distribuição espectral de potência relativa do

Tabela 1. Classificação, localização, profundidade de amostragem e material de origem dos solos estudados.

Classificação brasileira	Classificação americana ⁽¹⁾	Local de coleta	Profundidade (cm)	Material de origem
Latossolo Vermelho acriférrico (LVwf)	Rhodic Acrudox	Ribeirão Preto	100-140	Basalto
Latossolo Vermelho eutroférrico (LVef)	Rhodic Eutrudox	Itacemópolis	100-110	Basalto
Latossolo Vermelho distroférrico (LVdf)	Rhodic Hapludox	Luís Antonio	80-100	Basalto
Latossolo Vermelho acriférrico (LVwf)	Rhodic Acrudox	Luís Antonio	150-170	Basalto
Latossolo Amarelo árico (LAW)	Xanthic Acrustox	Guaíra	100-130	Basalto
Latossolo Vermelho distroférrico (LVd)	Typic Hapludox	Piracicaba	100-110	Folhelho
Latossolo Vermelho-Amarelo distroférrico (LVAd)	Typic Hapludox	Piracicaba	100-110	Arenito
Latossolo Vermelho-Amarelo distroférrico (LVAd)	Typic Hapludox	São Carlos	80-100	Arenito
Nitossolo Vermelho eutroférrico (NVef)	Typic Hapludalf	Piracicaba	30-40	Diabásio
Argissolo Vermelho-Amarelo distroférrico (PVAd)	Typic Hapludult	Pindorama	100-120	Arenito
Argissolo Vermelho-Amarelo distroférrico (PVAd)	Typic Hapludult	Vera Cruz	100-120	Arenito
Argissolo Vermelho eutrófico (PVe)	Typic Hapludult	Rio Claro	70-80	Folhelho
Argissolo Vermelho distroférrico (PVd)	Typic Hapludult	Piracicaba	100-110	Basalto
Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico (PVAe)	Typic Hapludult	São Pedro	20-35	Folhelho
Neossolo Quartzarênico órtico (RQo)	Typic Quartzipsamment	São Pedro	80-100	Arenito

⁽¹⁾Fonte: Estados Unidos (2001).

iluminante – utilizou-se o iluminante D65, padronizado pela CIE –; $R(\lambda)$ é a reflectância espectral da amostra; $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ são as funções que definem, respectivamente, a resposta do olho humano às cores vermelho, verde e azul para um observador padrão com campo de visão de 2° – essas funções também são padronizadas pela CIE –; e $d\lambda$ significa a diferencial do comprimento de onda.

O fator de normalização K utilizado nas equações 1, 2 e 3 permite o cálculo dos triestímulos em relação ao triestímulo Y do iluminante, ao qual atribui-se o valor 100.

Os iluminantes C e D65 são iluminantes padrões definidos pela CIE, ambos com uma distribuição espectral próxima à luz média do dia. O iluminante C possui temperatura de cor equivalente a 6.774 K e o D65, temperatura de cor equivalente a 6.504 K.

O observador padrão CIE caracteriza um indivíduo com visão colorida normal que participou de experimentos em laboratório, nos quais foram determinados os valores de $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ e $\bar{z}(\lambda)$ em toda a faixa espectral do visível.

Os valores de triestímulos XYZ foram transformados nas coordenadas do sistema $L^*a^*b^*$, por meio das equações:

$$L^* = 116t_1 - 16, \quad (5)$$

$$a^* = 500(t_1 - t_2), \quad (6)$$

$$b^* = 200(t_2 - t_3), \quad (7)$$

sendo:

$$t_1 = \begin{cases} \left(\frac{X}{X_n}\right)^{1/3} & \text{se } \frac{X}{X_n} > 0,008856 \\ 7,787\left(\frac{X}{X_n}\right) + \frac{16}{116} & \text{se } \frac{X}{X_n} \leq 0,008856, \end{cases} \quad (8)$$

$$t_2 = \begin{cases} \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3} & \text{se } \frac{Y}{Y_n} > 0,008856 \\ 7,787\left(\frac{Y}{Y_n}\right) + \frac{16}{116} & \text{se } \frac{Y}{Y_n} \leq 0,008856, \end{cases} \quad (9)$$

$$t_3 = \begin{cases} \left(\frac{Z}{Z_n}\right)^{1/3} & \text{se } \frac{Z}{Z_n} > 0,008856 \\ 7,787\left(\frac{Z}{Z_n}\right) + \frac{16}{116} & \text{se } \frac{Z}{Z_n} \leq 0,008856, \end{cases} \quad (10)$$

em que: X_n , Y_n , Z_n são os valores dos triestímulos para o iluminante D65, considerando o observador padrão CIE (Commission Internationale de l'Éclairage, 1931) com ângulo de visão de 2°, a saber: $X_n = 95,045$, $Y_n = 100,00$ e $Z_n = 108,892$.

Os índices de avermelhamento foram calculados a partir das equações propostas por Barrón & Torrent (1986):

$$IAV_{\text{Munsell}} = \frac{(10-H)^3 \cdot C \cdot 10^3}{V^6}, \quad (11)$$

$$IAV_{\text{Lab}} = \frac{a^* (a^*{}^2 + b^*{}^2)^{1/2} \cdot 10^{10}}{b^* L^*{}^6}. \quad (12)$$

A equação 11 foi proposta para cores expressas no sistema Munsell e a equação 12 para cores expressas no sistema $L^*a^*b^*$. As letras H, V e C significam, respectivamente, os valores de matiz, valor (ou brilho) e cromia (ou saturação) das cores do sistema Munsell. Os valores de matiz no sistema Munsell são formados por uma combinação de números e letras. Quando o valor numérico do matiz é seguido pelas letras YR, deve-se utilizar apenas os valores numéricos na fórmula do índice de avermelhamento, porém para o matiz 10YR deve-se utilizar H igual a 10, e para o matiz 10R, H igual a zero.

Modelos de regressão linear foram gerados para avaliar a possibilidade de semiquantificar os teores de hematita a partir dos índices de avermelhamento das amostras de solos. Para maior simplificação, os modelos, inicialmente exponenciais, foram linearizados aplicando-se logaritmo.

Resultados e Discussão

Ao proporem os índices de avermelhamento para amostras de solo (equações 11 e 12), Barrón & Torrent (1986) testaram vários expoentes para os termos que compõem esses índices de modo a obter melhor associação entre o índice de avermelhamento e teor de hematita. Esses pesquisadores, utilizando modelos de regressão linear, obtiveram bons ajustes ($R^2 > 0,995$) quando os teores de hematita eram inferiores a 150 g kg⁻¹ em amostras de solo desferrificadas com adição de conteúdos conhecidos de hematita sintética. Quando as equações de regressão obtidas foram utilizadas em amostras de solos com teores de hematita determinados a partir de difratometria de raios-X, os coeficientes de determinação foram menores: 0,67 para cores no sistema Munsell e 0,87 para cores no sistema $L^*a^*b^*$.

No presente trabalho, os teores de hematita das amostras variaram de 0 a 223,5 g kg⁻¹, compreendendo uma faixa de variação mais ampla do que a das amostras de Barrón & Torrent (1986) (Tabela 2). A disposição dos dados em diagrama de dispersão mostrou tendências de relações exponenciais entre os índices de avermelhamento e os teores de hematita. Desse modo, optou-se pelo uso do modelo exponencial $Y_i = \beta_0 e^{\beta_1 X_i}$ para a descrição do

relacionamento entre as referidas variáveis. Antes de ser ajustado, o modelo foi linearizado por meio de transformação logarítmica, resultando na equação: $Y_i' = \beta_0' + \beta_1 X_i + \varepsilon_i'$, em que $Y_i' = \ln Y_i$, $\beta_0' = \ln \beta_0$ e $\varepsilon_i' = \ln \varepsilon_i$.

As equações das retas, estimadas pelo método de mínimos quadrados, seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), os intervalos de confiança estabelecidos para $E(Y|X_0)$ e para a predição, ambos com 95% de probabilidade, são apresentados nas Figuras 1 e 2. Testes de hipóteses baseados nos testes F e t rejeitam a hipótese $H_0: \beta_1 = 0$ a 5% de probabilidade em todos os casos analisados, indicando a existência de uma relação linear entre os logaritmos dos índices de avermelhamento e os teores de hematita.

Os valores de R^2 obtidos mostram elevados coeficientes de determinação entre as variáveis teor de hematita e o logaritmo natural do IAV calculado a partir das cores no sistema $L^*a^*b^*$ fornecidas pelo colorímetro ou pelos dados do fator de reflectância (Figuras 1 e 2). Por sua vez, a maior amplitude para o intervalo de confiança das estimativas fornecidas pela equação gerada a partir de valores de IAV, cal-

culados no sistema Munsell, indica menor exatidão na estimativa do referido índice.

As equações de regressão obtidas no presente trabalho, especialmente para as cores expressas no sistema $L^*a^*b^*$, demonstram um bom potencial para a estimativa dos teores de hematita presentes na fração argila de solos e reiteram a utilidade da obtenção de índices colorimétricos a partir de dados de fator de reflectância na região do visível para avaliações semiquantitativas de atributos pedológicos (Madeira Netto et al., 1997; Demattê & Garcia, 1999; Nanni & Demattê, 2001).

Os resultados do presente trabalho demonstram

Tabela 2. Teores de hematita e índices de avermelhamento (IAV) das amostras de solo.

Solo ⁽¹⁾	Teor de hematita (g kg ⁻¹)	IAV (Munsell) (colorímetro)	IAV (L*a*b*) (colorímetro)	IAV (L*a*b*) (fator de reflectância)
LV1	223,5	346,83	139,29	217,89
LV2	204,8	275,32	134,11	326,15
LV3	210,7	307,55	127,12	252,54
LV4	223,5	264,46	113,82	296,01
LA1	0,0	0,54	4,54	6,41
LV5	23,0	54,01	12,81	25,11
LVA1	20,6	25,48	12,36	16,56
LVA2	1,9	8,77	7,89	11,56
NV1	127,6	105,74	30,66	61,66
PVA1	2,7	7,76	6,14	9,84
PVA2	14,0	13,36	6,18	9,00
PV1	23,4	7,36	8,37	17,40
PV2	25,5	25,14	7,43	9,48
PVA3	10,6	3,74	7,09	10,67
RQ1	5,6	6,29	8,55	9,06

⁽¹⁾LV1: Latossolo Vermelho acriférrico; LV2: Latossolo Vermelho eutrófico; LV3: Latossolo Vermelho distroférrico; LV4: Latossolo Vermelho acriférrico; LA1: Latossolo Amarelo ácrico; LV5: Latossolo Amarelo ácrico; LVA1: Latossolo Vermelho distrófico; LVA2: Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; NV1: Nitossolo Vermelho eutrófico; PVA1: Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; PVA2: Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; PV1: Argissolo Vermelho eutrófico; PV2: Argissolo Vermelho distrófico; PVA3: Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico; RQ1: Neossolo Quartzarênico órtico (Embrapa, 1999).

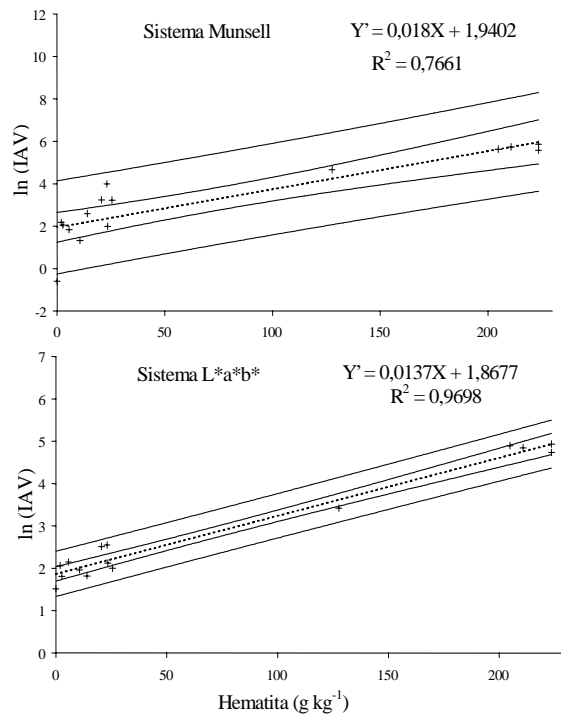


Figura 1. Relação entre \ln (IAV) e teor de hematita para índices de avermelhamento (IAV) calculados a partir das leituras de cor de amostras de solo fornecidas pelo colorímetro nos sistemas Munsell e $L^*a^*b^*$. As linhas tracejadas representam as retas ajustadas para o modelo exponencial linearizado; as duas linhas cheias externas representam os limites do intervalo de predição de 95% para Y' relativo a uma nova observação com teor de hematita igual a X_0 ; as duas linhas cheias internas representam os limites do intervalo de 95% de confiança para $E(Y'|X_0)$. Os sinais "+" representam os valores utilizados no ajuste.

que a utilização do colorímetro permite a avaliação de cores de amostras de solos de forma simples e rápida. Além disso, possibilita a obtenção de índices de avermelhamento com excelente grau de associação com os teores de hematita de solos, à semelhança dos calculados a partir de coeficientes de cor derivados de dados de fator de reflectância.

Contudo, as coordenadas $L^*a^*b^*$ fornecidas pelo colorímetro referem-se às amostras iluminadas por uma fonte com distribuição espectral de potência igual ao iluminante padrão C; já no cálculo das coordenadas por dados de fator de reflectância utilizou-se o iluminante padrão D65. Portanto, as diferenças nas coordenadas de cores $L^*a^*b^*$ para uma mesma amostra são devidas não apenas aos diferentes métodos utilizados mas também aos diferentes iluminantes utilizados em cada método.

Madeira Netto et al. (1997) obtiveram elevada relação funcional ($R^2 = 0,95$) entre a reflectância e teores de hematita de solos, muito similar à observada no presente trabalho ($R^2 = 0,96$). Apesar das diferenças entre os métodos empregados, a base para determinação dos modelos, ou seja, a reflectância, foi a mesma, o que reitera sua utilidade na avaliação semiquantitativa de atributos do solo.

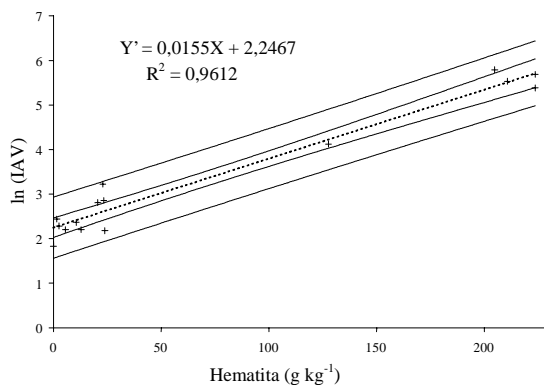


Figura 2. Relação entre $\ln(\text{IAV})$ e teor de hematita para índices de avermelhamento (IAV) calculados a partir das cores no sistema $L^*a^*b^*$ obtidas a partir de dados de fator de reflectância das amostras de solos. A linha tracejada representa a reta ajustada para o modelo exponencial linearizado; as duas linhas cheias externas representam os limites do intervalo de predição para Y' relativo a uma nova observação com teor de hematita igual a X_0 ; as duas linhas cheias internas representam o limite do intervalo de confiança para $E(Y'|X_0)$. Os sinais "+" representam os valores observados utilizados no ajuste.

A aplicação das equações de regressão obtidas são válidas apenas quando as cores são determinadas pelo mesmo método e sob o mesmo iluminante utilizado na estimação de cada equação. Contudo, mesmo com diferentes iluminantes, a hipótese de igualdade dos coeficientes angulares das retas de regressão para índices de avermelhamento obtidas a partir das coordenadas $L^*a^*b^*$ não é rejeitada pelo teste F a 5% de probabilidade, embora o mesmo teste rejeite a hipótese de igualdade dos coeficientes lineares. Há, portanto, evidências de que as retas ajustadas são paralelas, implicando mesma taxa de variação do IAV em relação ao teor de hematita, em ambos os casos.

O comportamento dos modelos exponenciais são semelhantes aos dos modelos lineares para baixos valores de hematita, o que não invalida as equações de regressão obtidas por Barrón & Torrent (1986).

A utilização dos modelos exponenciais linearizados torna possível o cálculo dos parâmetros β_0' e β_1 das equações de regressão, além de tornar o modelo mais simples para análises e predições; entretanto os dados correspondentes à variável dependente (IAV) devem sofrer uma transformação logarítmica. Caso se queira trabalhar com os modelos na forma exponencial, basta, a partir do parâmetro β_0' do modelo linearizado, obter o parâmetro β_0 através da equação $\beta_0 = e^{\beta_0'}$. Os gráficos e equações de regressão na forma exponencial são apresentados nas Figuras 3 e 4.

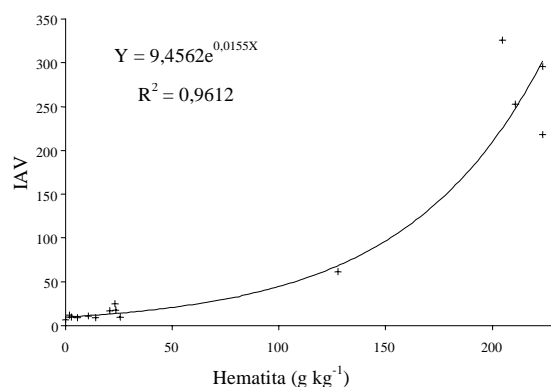


Figura 3. Relação entre índice de avermelhamento (IAV) e teor de hematita para IAVs calculados a partir das cores no sistema $L^*a^*b^*$ obtidas a partir de dados de reflectância das amostras de solos.

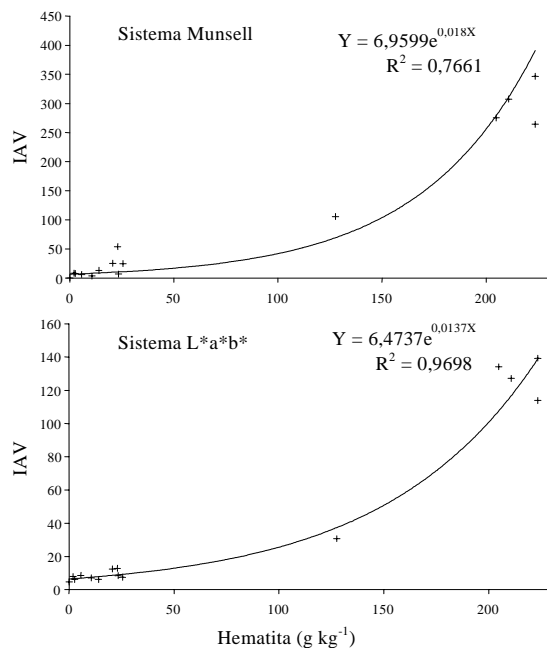


Figura 4. Relação entre índice de avermelhamento (IAV) e teor de hematita para IAVs calculados a partir das leituras de cor de amostras de solo fornecidas pelo colorímetro nos sistemas Munsell e L*a*b*.

Conclusões

1. A semiquantificação dos teores de hematita em solos torna-se mais rápida e menos onerosa por meio do estabelecimento de curvas de calibração, representadas por modelos exponenciais linearizados, que descrevem a associação entre índices de avermelhamento e teor de óxido de ferro.

2. Índices de avermelhamento são adequadamente calculados a partir da avaliação da cor de amostras de solo nos sistemas L*a*b* ou Munsell e derivados de medidas de cor e reflectância efetuadas por meio de radiometria.

3. Os melhores ajustamentos entre índice de avermelhamento e teores de hematita são obtidos com a determinação de cores no sistema L*a*b*, efetuada tanto por colorimetria quanto por radiometria.

4. A elaboração de curvas de calibração envolvendo maior número de amostras é altamente desejável para a efetiva utilização da radiometria na semiquantificação dos teores de hematita em solos.

Agradecimentos

À Fapesp, pela bolsa do primeiro autor (processo 00/02226-6) e recurso para aquisição do colorímetro (processo 98/3516-6); ao INPE, por ter cedido o espectrorradiômetro Fieldspec; ao Dr. Arquimedes Lavorenti e Dr. Marcelo Eduardo Alves, pela semiquantificação dos teores de hematita.

Referências

BARRÓN, V.; TORRENT, J. Use of the Kubelka-Munk theory to study the influence of iron oxides on soil colour. *Journal of Soil Science*, Oxford, v. 37, p. 499-510, 1986.

CAMPOS, R. C. **Determinação da cor do solo e sua utilização na predição dos teores de hematita**. 2002. 59 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2002.

COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE (Vienna, Austria). **Proceedings of the eight session**. Cambridge, Inglaterra: Bureau Central de la Commission Internationale de L'Éclairage, 1931. 326 p.

DEMATTÊ, J. A. M.; GARCIA, G. J. Alteration of soil properties through a weathering sequence as evaluated by spectral reflectance. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 63, p. 327-342, 1999.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa-SPI/Embrapa-CNPS, 1999. 412 p.

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. **Soil survey**. Disponível em: <<http://www.soils.usda.gov>>. Acesso em: jun. 2001.

FORMAGGIO, A. R.; EPIPHANIO, J. C. N.; VALERIANO, M. M.; OLIVEIRA, J. B. Comportamento espectral (450-2.450 nm) de solos tropicais de São Paulo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 20, p. 467-474, 1996.

GALVÃO, L. S.; VITORELO, I. Role of organic matter in obliterating the effects of iron on spectral reflectance and color of Brazilian tropical soils. *International Journal of Remote Sensing*, London, v. 19, p. 1969-1979, 1998.

- MCLAREN, K. The development of the CIE 1976 (L*a*b*) uniform colour-space and colour-difference formula. **Journal of the Society of Dyers and Colourists**, v. 92, p. 338-341, 1976.
- MADEIRA NETTO, J. A.; BÉDIDI, A.; CERVELLE, B. Visible spectrometric indices of hematite (Hm) and goethite (Gt) content in lateritic soils: the application of a thematic mapper (TM) image for soil-mapping in Brasília, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 18, p. 2835-2852, 1997.
- NANNI, M. R.; DEMATTÊ, J. A. M. Quantification and discrimination of soils developed from basalt as evaluated by terrestrial, airborne and orbital sensors. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001. p. 1441-1449. CD-ROM. Sessão técnica oral.
- NETTO, A. R. **Influência da mineralogia da fração argila sobre propriedades físico-químicas de solos brasileiros**. 1996. 144 f. Dissertação (Mestrado em Solos) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1996.
- RESENDE, M.; BAHIAFILHO, A. F. C.; BRAGA, J. M. Mineralogia da fração argila de latossolos estimada por alocação a partir do teor total de óxidos do ataque sulfúrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 11, p. 17-23, 1987.
- REZENDE, S. B. **Geomorphology, mineralogy and genesis of four soils on gneiss in Southeastern Brazil**. West Lafayette: Purdue University, 1980. 143 p.
- SÁNCHEZ-MARAÑÓN, M.; DELGADO, G.; DELGADO, R.; PÉREZ, M. M.; MELGOSA, M. Spectroradiometric and visual color measurements of disturbed and undisturbed soil samples. **Soil Science**, Baltimore, v. 160, p. 291-303, 1995.
- TORRENT, J.; SCHWERTMANN, U. Influence of hematite on the color of red beds. **Journal of Sedimentary Petrology**, Tulsa, v. 57, p. 682-686, 1987.