

## Relação entre o fator de reflectância e o teor de Óxido de Ferro em Latossolos Brasileiros

Silvana Andreoli Espig<sup>1</sup>  
Ilka Afonso Reis<sup>1</sup>  
Eliene Pontes Araújo<sup>1</sup>  
Antônio Roberto Formaggio<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{eliene, ilka, andreoli, formag}@ltid.inpe.br

**Abstract.** Relationships between soil constituents and their spectral behavior have been widely searched. The objective of this work was to generate models for estimating the iron oxide content from some Brazilian "latossolos" (Oxysols) samples using spectral reflectance curves obtained in lab conditions (400-2500 nm range). For each soil horizon, the samples were grouped considering their spectral reflectance behavior and their organic matter content, thus generating three characteristic groups of soils. From the spectral curves, three parameters were calculated: (a) the slope in the 450-800 nm interval; (b) the concavity in the 450 and 1300 nm interval; and (c) the depth of the 800-950 nm iron absorption band. The variables concavity and depth were not correlated to the iron oxide contents; but the analyses showed that for one group of soil samples the variable slope could be used to estimate the iron oxide content, since the reflectance curve of a given sample of "latossolo" fits the spectral pattern of that considered group.

**Palavras-chave:** organic matter, iron oxide, oxysols, reflectance factor, matéria orgânica

### 1. Introdução

Os Latossolos brasileiros totalizam uma superfície de cerca de 331.637.200 ha, correspondendo a aproximadamente 39% do território brasileiro. Possuem excelentes condições físicas e, embora apresentem limitações quanto à fertilidade natural, tornam-se excepcionalmente produtivos quando utilizados sob sistemas de manejo tecnificados que incluam a correção da acidez, o aumento da fertilidade e o controle da erosão. Em geral, ocorrem em áreas de topografia favorável à mecanização, em amplas superfícies planas, suave onduladas a onduladas e, devido a estas condições, sustentam grande parte da produção de grãos, pastagens, cana-de-açúcar e quase a totalidade da soja produzida no país (Santos, 1999).

Os latossolos são classificados como solos maduros em termos de processos pedológicos e formados sob condições tropicais. Por causa do intenso processo de intemperismo e lixiviação a que foram submetidos, apresentam quase que uma ausência total de minerais primários facilmente intemperizáveis. Em contrapartida, ocorre uma concentração de óxidos minerais (óxido de alumínio  $Al_2O_3$  e óxidos de ferro,  $Fe_2O_3$  - hematita - e  $Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$  - ilmenita).

Os óxidos de ferro são minerais de argila predominantes nos solos tropicais e são importantes no contexto de produção vegetal, pois podem influenciar o desenvolvimento das culturas por interferirem no suprimento de nutrientes (baixa capacidade de troca catiônica, CTC).

As análises para determinação de óxidos são feitas utilizando métodos convencionais, que são complexos, demorados, caros e não disponíveis em procedimentos rotineiros. Alguns trabalhos relacionam os teores de hematita com os dados de sensoriamento remoto (Fernandes

et al. 2004, Campos et al., 2003; Demattê et al., 2003; Madeira Netto et al., 1997), podendo estes, auxiliar os estudos dos solos.

Nos últimos anos, tem sido grande o interesse pela obtenção de informações que caracterizem as propriedades dos solos através de estudos da energia eletromagnética refletida (Epiphanyo et al., 1992; Formaggio et al., 1996 ; Pizzarro et al., 2001 ; D'Arco et al., 2003; Alvarenga et al., 2003; Demattê et al, 2003;).

No sensoriamento remoto, a reflectância espectral de solos pode ser usada como um critério importante na identificação dos mesmos, sendo altamente variável ao longo da região do espectro eletromagnético que vai de 400 a 2500 nm. O estudo de certas feições de absorção de energia em determinados comprimentos de onda ou em regiões espectrais bem definidas vem sendo utilizado para obter informações sobre solos (Epiphanyo et al, 1992). Contudo, a natureza complexa dos relacionamentos entre a resposta espectral dos solos e suas propriedades físico-químicas dificulta a caracterização destas propriedades a partir de dados de reflectância.

Diversas pesquisas têm mostrado que a reflectância de solos é influenciada por vários fatores, como matéria orgânica, granulometria, composição mineralógica e umidade, dentre outros. Geralmente, tem-se observado que a remoção da matéria orgânica promove aumento de reflectância na faixa espectral de 400 a 2500 nm e a sua complexidade de constituição torna difícil a compreensão de aspectos mais detalhados da sua influência sobre a reflectância dos solos (Stoner e Baumgardner, 1981). Outro elemento que exerce grande influência nas curvas de reflectância são os óxidos de ferro (Montgomery,1976; Stoner e Baumgardner, 1981; Demattê et al., 2003). Trabalhos com resultados positivos na estimação de hematita relacionam os teores deste mineral com a cor da amostra de solo quando convertida em índice de avermelhamento (Campos et al., 2003).

A necessidade de estimação dos teores de óxidos de ferro a partir de curvas de reflectância espectral dos solos está relacionada à busca de maior agilidade e de menores custos de análises em relação aos métodos convencionais.

As hipóteses que nortearam a presente pesquisa foram: 1) os horizontes superficial e sub-superficial diferem quanto aos teores de óxido de ferro e porcentagens de carbono; 2) em um dado horizonte, é possível dividir os diferentes tipos de latossolos em grupos a partir dos dados de reflectância entre 400 e 2500 nm, aproximadamente, e dos dados de porcentagem de carbono; 3) a partir das relações entre as curvas de reflectância, matéria orgânica e teor de óxido de ferro descritas por Stoner e Baumgardner (1981), percebeu-se que a inclinação das curvas entre 450 e 800 nm e a profundidade da banda entre 800 e 950 nm poderiam ser indicativos promissores do teor de óxido de ferro, bem como a concavidade entre 450 e 1300 nm pode ser para a matéria orgânica. Sendo assim, a estimação de óxido de ferro em latossolos pode ser feita a partir de: a) inclinação da curva de reflectância entre 450 e 800 nm; b) concavidade da curva de reflectância entre 450 e 1300 nm; e c) profundidade da banda de absorção situada entre 800 e 950 nm.

No presente trabalho, o objetivo foi estimar o grau de correlação entre teores de óxidos de ferro e a curva de reflectância espectral (400 – 2500 nm) de latossolos brasileiros, através de medidas de concavidade, inclinação e profundidade de banda. Para atingir este objetivo, realizou-se uma análise de agrupamento (conglomerados) das amostras de latossolos

brasileiros por porcentagem de carbono e reflectância espectral nos comprimentos de onda de 400 a 2500 nm, calculou-se a profundidade (P), concavidade (C) e inclinação (I) de bandas pré-estabelecidas e correlacionou-se P, I e C com os teores de óxido de ferro obtidos por análise química.

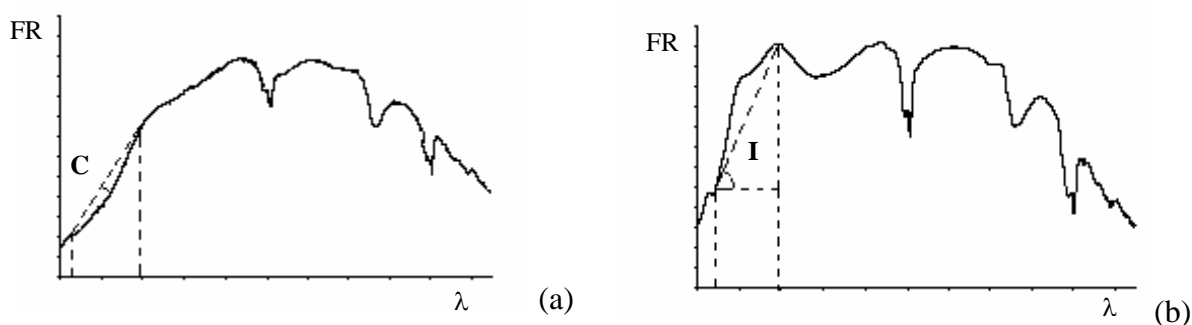
## 2. Materiais e Métodos

As amostras de latossolo foram retiradas do banco de amostras da EMBRAPA-Solos. Foram utilizadas 101 amostras, sendo 38 de LATOSSOLO VERMELHO AMARELO (LVA1, teores de óxidos de ferro inferiores a 8%); 4 de LATOSSOLO VERMELHO AMARELO (LVA2, antigamente denominados “Latossolo Una”, teores de óxidos de ferro entre 11 e 18%); 31 de LATOSSOLO AMARELO (LA, teores de óxidos de ferro inferiores a 8%); 22 de LATOSSOLO VERMELHO (LV1, teores de óxidos de ferro menores que 18%); e 6 de LATOSSOLO VERMELHO (LV2, antigamente denominados “Latossolo Roxo”, teores de óxidos de ferro maiores que 18%) (EMBRAPA, 1999). Estas amostras foram coletadas nos estados do Amazonas, Amapá, Rio de Janeiro, Rondônia, Roraima, Goiânia, Mato Grosso do Sul e Paraná. De maneira geral, as amostras apresentavam textura argilosa (teor de argila maior do que 35%)

Para a determinação das curvas de reflectância, foi utilizado o sistema sensor “Dual Field of View Mark IV Infra-Red Intelligent Spectroradiometer” (IRIS). Este instrumento cobre o intervalo espectral de 300 nm a 3.0 micron em varredura contínua com resolução espectral de 2 nm entre 300 nm e 1000 nm e de 4 nm na região de 1.0 e 3.0 micron. Maiores detalhes sobre os métodos de aquisição podem ser encontrados em Epiphany et al. (1992).

A determinação dos teores de óxido de ferro (g/kg) e de carbono (%) seguiu a metodologia da EMBRAPA (1997).

A variável Concavidade (C) representa a soma das diferenças entre a reta que liga os pontos da curva de reflectância onde comprimento de onda ( $\lambda$ ) vale 450 e 1300 nm e o valor da reflectância em cada comprimento de onda compreendido entre estes dois valores. A FIGURA1(a) ilustra o cálculo da concavidade. Valores positivos indicam que a curva de reflectância apresenta concavidade entre estes dois valores de  $\lambda$ , enquanto valores negativos indicam a presença de convexidade. A variável Inclinação (I) representa o ângulo de inclinação (em graus) da reta que liga o ponto da curva de reflectância onde  $\lambda$  vale 450 nm ao ponto onde  $\lambda$  vale 800 nm, como ilustrado na FIGURA1(b). A variável Profundidade (P) representa a profundidade máxima da curva de reflectância na banda situada entre 800 e 950 nm, como mostra a FIGURA1(c).



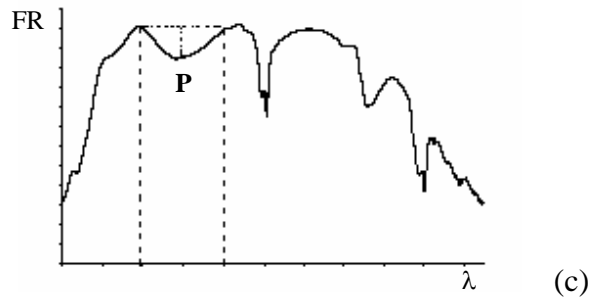


FIGURA 1 – Ilustrações para o cálculo das variáveis Concavidade (C), Inclinação (I) e Profundidade (P).

### 3. Análise Estatística

As análises estatísticas foram feitas separadamente por horizonte, superficial e sub-superficial.

Para separar as amostras de latossolo em grupos homogêneos, foi utilizada a técnica de análise de conglomerados (Mardia et al, 1988). As variáveis utilizadas no agrupamento foram as reflectâncias entre 400 nm e 2500 nm e a porcentagem de carbono. O método de ligação utilizado foi o da média das distâncias entre todos os pontos (*average*). O método do vizinho mais próximo (*single*) e o método do vizinho mais distante (*complete*) produziram agrupamentos iguais aos produzidos pelo método da média.

As análises de correlação utilizaram o coeficiente de correlação linear de Pearson.

### 4. Resultados e Discussão

A FIGURA 2 mostra a distribuição da porcentagem de carbono e do teor de óxido de ferro nos horizontes superficial e sub-superficial nas amostras de latossolos utilizadas.

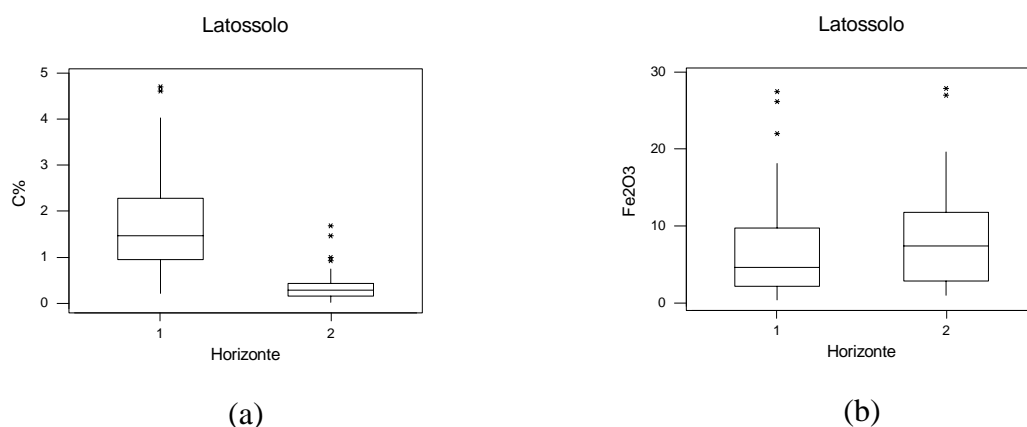


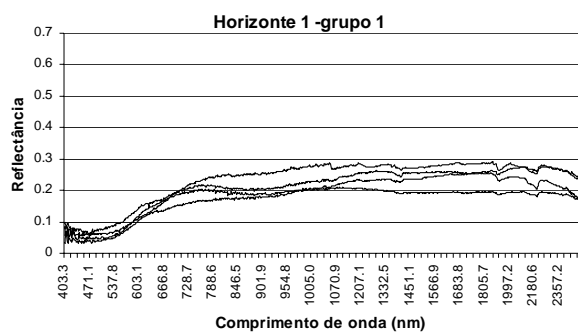
FIGURA 2. Distribuição de porcentagem de carbono (a) e óxido de ferro (b) nos horizontes superficial (1) e sub-superficial (2) em amostras de latossolos brasileiros.

Observa-se que os horizontes diferem entre si quanto à porcentagem de carbono, sendo que o horizonte superficial (1) destaca-se pelas maiores porcentagens e variabilidade de carbono em

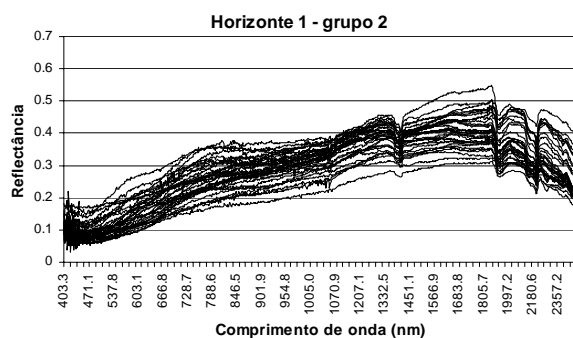
relação ao horizonte sub-superficial (2). Isto pode ser explicado pela cobertura vegetal em maior contato com o horizonte superficial e pela menor propensão desta classe de solo à eluviação. Quanto aos teores de óxido de ferro, não foram constatadas diferenças, como pode ser observado na FIGURA 2(b). Portanto, a análise da FIGURA 2 confirma parte da hipótese 1.

A hipótese 2 foi verificada a partir de uma análise de conglomerados, feita em cada horizonte, utilizando-se como variáveis as reflectâncias entre 400 e 2500 nm e a porcentagem de carbono. As amostras foram melhor divididas em três grupos (FIGURA 3). No horizonte 1, pode-se observar que as curvas foram divididas principalmente considerando seus valores máximos de reflectância e a suavidade de seu crescimento na faixa do visível e infravermelho até 800 nm, aproximadamente. O grupo 1 é formado por curvas de reflectância características de amostras de LV1 e LV2 (Epiphany et al., 1992), que se destacam das demais pela baixa reflectância ao longo de espectro eletromagnético. Considerando o trabalho de Formaggio et al. (1996), as curvas deste grupo podem ser enquadradas no padrão do tipo C. Por se tratar de um grupo com um número extremamente pequeno de amostras, optou-se por utilizá-lo nos modelos de estimativa de óxido de ferro. No horizonte 2, a divisão em grupos foi influenciada pelos mesmos fatores do horizonte 1, bem como pela profundidade da banda de absorção no infravermelho próximo.

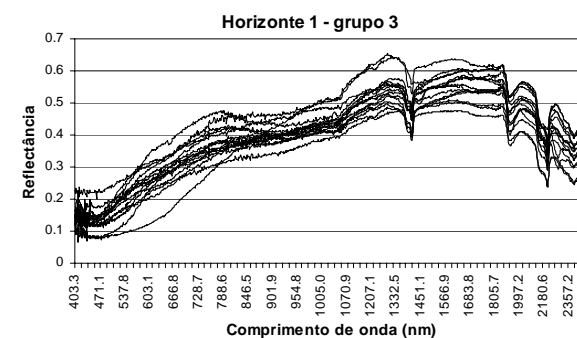
Para verificar a hipótese 3, foram calculados os coeficientes de correlação linear entre os teores de óxido de ferro (e porcentagem de carbono) e as variáveis inclinação, profundidade e concavidade, apresentados na TABELA 1 e na TABELA 2. Como pode ser observado, em todos os grupos, com exceção do grupo 1 do horizonte 2, encontraram-se correlações positivas entre a inclinação da curva de reflectância entre 450 e 800 nm e o teor de óxido de ferro. Isto indica que, quanto maior a inclinação da curva na banda considerada, maior o teor de óxido de ferro nas amostras de solo estudadas. A alta correlação encontrada no grupo 2 do horizonte 2 possibilitou o ajuste de uma equação de regressão linear para estimativa do teor de óxido de ferro a partir da inclinação da curva entre 450 e 800 nm, mostrada na FIGURA 4. Observa-se que a variável inclinação sozinha explicou cerca de 71% da variabilidade do teor de óxido de ferro nas amostras de latossolos estudadas.



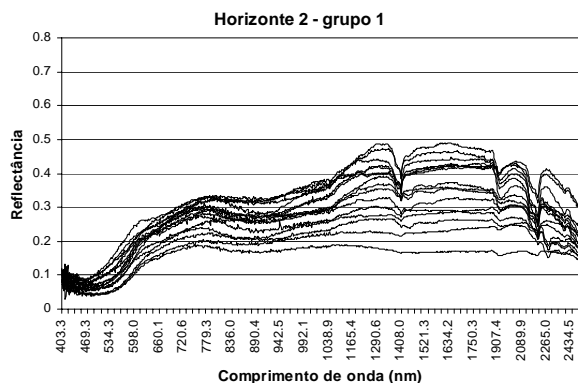
4 amostras



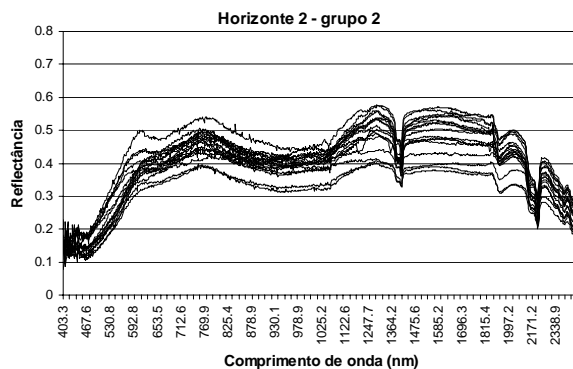
33 amostras



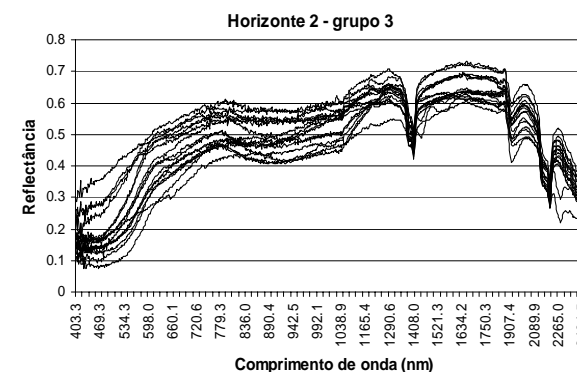
15 amostras



16 amostras



17 amostras



16 amostras

FIGURA 3. Curvas de reflectância das amostras de latossolos agrupadas a partir da resposta espectral entre 400 e 2500 nm e da porcentagem de carbono nos dois horizontes.

TABELA 1. Coeficiente de correlação linear entre as variáveis teor de óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e porcentagem de carbono (%C) e as variáveis Inclinação, Profundidade e Concavidade, no horizonte 1.

	Horizonte 1			
	Grupo 2		Grupo 3*	
	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	%C	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	%C
Inclinação	0.378	n.s.	0.639	0.529
Profundidade	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Concavidade	-0.362	n.s.	-0.684	n.s.
$\text{Fe}_2\text{O}_3 \times \%C$	n.s.		0.730	

\*Sem uma amostra de latossolo amarelo (*outlier*).

TABELA 2. Coeficiente de correlação linear entre as variáveis teor de óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e porcentagem de carbono (%C) e as variáveis Inclinação, Profundidade e Concavidade, no horizonte 1.

	Horizonte 2					
	Grupo 1		Grupo 2		Grupo 3	
	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	%C	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	%C	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	%C
Inclinação	n.s.	n.s.	0.841*	n.s.	0.525	0.593
Profundidade	n.s.	n.s.	n.s.	-0.495	n.s.	0.649
Concavidade	-0.576	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
$\text{Fe}_2\text{O}_3 \times \%C$	n.s.		0.726		0.738	

\* Sem uma amostra de LV1, considerada ponto influente devido à seu alto valor de inclinação e seu médio valor de teor de óxido de ferro.

Desde que a curva de reflectância espectral da amostra de solo se enquadre no padrão das curvas do grupo 2 do horizonte 2, pode-se dizer que, a cada aumento de 1 grau na inclinação da curva entre 450 e 800 nm, há um aumento de 1.48 g/kg no teor médio de óxido de ferro.

As variáveis concavidade e profundidade das bandas estudadas não apresentaram correlações expressivas para justificar seu uso na estimação do teor de óxido de ferro, contrariando as expectativas no caso da variável profundidade da banda entre 800 e 950 nm, região na qual se sabe haver uma banda de absorção de energia pelo óxido de ferro (Epiphany et al, 1992). Na FIGURA3, pode-se observar que nenhuma das curvas apresentou uma banda de absorção profunda entre 800 e 950 nm, o que pode ter dificultado sua correlação com os teores de óxido de ferro.

Observaram-se correlações moderadas entre a porcentagem de carbono e o teor de óxido de ferro em quase todos os grupos estudados. Este relacionamento pode ser devido à textura argilosa da maioria das amostras analisadas, visto que a textura influencia a capacidade dos solos em proteger a degradação da matéria orgânica e que o óxido de ferro pode ser o mineral predominante da fração argila.

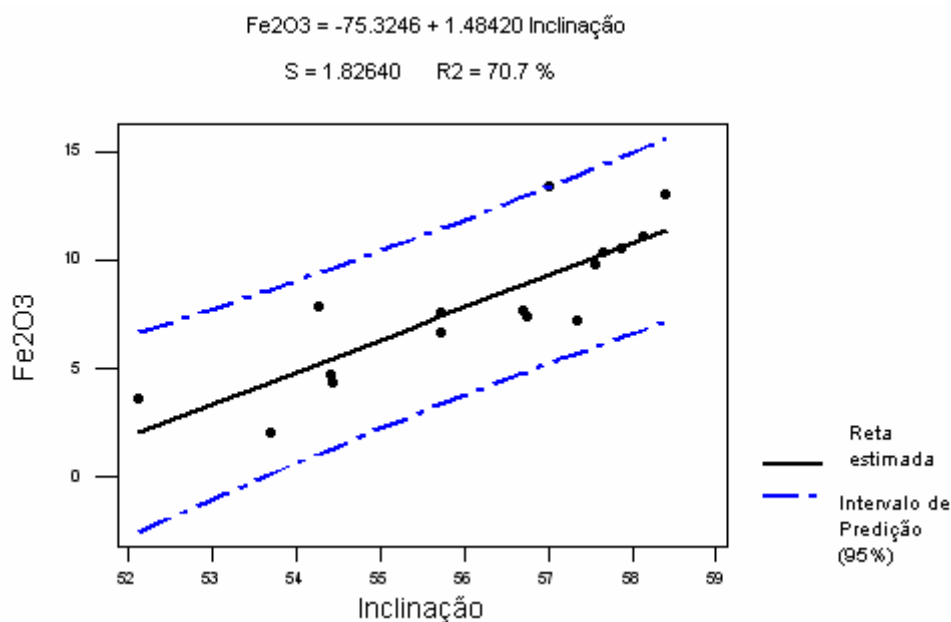


FIGURA 4 – Ajuste da equação de regressão linear para estimação do teor de óxido de ferro a partir da inclinação da curva entre 450 e 800 nm no grupo 2 do horizonte 2 (S – desvio-padrão ; R<sup>2</sup> – coeficiente de determinação)

## 5. Conclusões

1. A análise de agrupamento das amostras de latossolos por porcentagem de carbono e reflectância espectral nos comprimentos de onda de 400 a 2500 nm mostrou-se apropriada para separar as curvas de reflectância em grupos homogêneos.
2. O teor de óxido de ferro e as variáveis profundidade e concavidade de bandas não se correlacionaram.
3. A inclinação da curva de reflectância entre 450 e 800 nm pode ser uma variável utilizada para estimação do teor de óxido de ferro, desde que a curva se enquadre no padrão de curvas gerado.

## 6. Considerações Finais

Convém ressaltar que os dados analisados não se originaram de amostras coletadas com o objetivo específico de gerar modelos de estimação dos teores de ferro. Deste modo, uma coleta planejada com esta finalidade deveria considerar aspectos importantes como um número maior de amostras da mesma classe de solo e no mesmo horizonte. Outro fator a ser levado em conta é o controle de variáveis que sabidamente influenciam a resposta espectral dos solos e que possivelmente estariam associadas ao teor de ferro. Neste trabalho, pode-se citar o exemplo da porcentagem de carbono, que notoriamente influencia a reflectância dos solos e mostrou-se correlacionada ao teor de ferro em quase todos os grupos estudados.

Considerando a natureza complexa dos relacionamentos entre a resposta espectral dos solos e suas propriedades físico-químicas, a magnitude dos coeficientes de correlação encontrados deve ser vista como um indicador positivo de que a estimação de o teor de óxido de ferro de uma amostra de solo a partir de sua resposta espectral pode ser viável.



## 7. Referências

- Alvarenga, B.S.; D'Arco, E.; Adami, M.; Formaggio, A.R. O ensino de conceitos e práticas de espectrorradiometria laboratorial: estudo de caso com solos do estado de São Paulo. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 739-747.
- Baumgardner, M. F.; Stoner, E. R.; Silva, L. F.; Biehl, L. L. **Reflective properties of soils**. In: Brady, N. (Ed), *Advances in Agronomy*, 38. Academic Press, New York, pp. 1-44. 1985.
- Campos, R. C.; Demattê, J. A. M.; Quartaroli, C. F. Determinação indireta do teor de hematita no solo a partir de dados de colorimetria e radiometria **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, n.4, p. 521-528, 2003
- D'Arco, E.; Alvarenga, B.S.; Moura, P.; Teixeira, C.G. Estudos de reflectância de amostras de 5 tipos de solos brasileiros, em condições de laboratório. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 2327-2334.
- Demattê, J. A. M.; Formaggio, A.R.; Epiphanyo, J.C.N. Influência da matéria orgânica e de formas de ferro na reflectância de solos tropicais. **Bragantia**, v.62, n.3, p. 451-464, 2003
- Demattê, J. A. M.; Campos, R. C.; ALVIs, M. C. Avaliação espectral de solos desenvolvidos em uma toposequência de diabásio e folhelho da região de Piracicaba, SP. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.35, n.12, p.2447-2460, dez. 2000.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2 ed. Ver. Atualiz. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1997. 212 p. il. (EMBRAPA)
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Serviço de Produção. 1999. 412 p.
- Epiphanyo, J.C.N.; Formaggio, A.R.; Valeriano, M.M.; Oliveira; J.B. **Comportamento espectral de solos do Estado de São Paulo**. São José dos Campos, SP, INPE, 1992. 132 p. (INPE-5424-PRP/172).
- Fernandes, R. B. A. ; Barrón, V. ; Torrent, J. ; Fontes, M. P. F. Quantificação de óxidos de ferro de latossolos brasileiros por espectroscopia de refletância difusa. **Revista Brasileira Ciências do Solo**, v. 28, p. 245-257.
- Formaggio, A.R.; Epiphanyo, 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**. v.20, p. 467-474, 1996.
- Madeira Neto, J. A. ; Bédidi, A.; Cerville, 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.
- Mardia, K.V ; Kent, J.T.; Bibby, J.M. **Multivariate Analysis**, Academic Press, San Diego, 518 p.,1988
- Montgomery, O. L.. **An investigation of the relationship between spectral reflectance and the chemical, physical and genetic characteristics of soils**. West Lafayette, Purdue University, 1976, 185 p. (Tese de Doutorado)
- Pizarro, M.A.; Epiphanyo, J.C. N.; Galvão, L.S. Caracterização mineralógica de solos tropicais por sensoriamento remoto hiperespectral. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**., v. 36, n. 10, p. 1277-1286, 2001.
- Santos, H. G. . Latossolos do Brasil, 1999. Disponível em <http://www.cnps.embrapa.br/search/pesqs/tema1/tema1.html>. Acesso em 20 de julho de 2004
- Stoner, E.R.; Baumgardner, M. F.. Characteristics variations in reflectance of surface soils. *Soil Science Society American Journal*, n. 45, p. 1161-1165, 1981.