

**CARACTERIZAÇÃO ESPECTRORRADIOMÉTRICA DE MATERIAIS
DA COBERTURA LATERÍTICA DE ROCHAS DOS GRUPOS
IGARAPÉ BAHIA, IGARAPÉ POJUÇA E RIO FRESCO,
DA PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS.**

S. B. A. ROLIM
R. VEDOVELLO
M. A. R. ROCIO
A. O. GOMES NETO

Instituto de Pesquisas Espaciais
Secretaria Especial de Ciência e Tecnologia
Caixa Postal 515
12201 - São José dos Campos, SP

RESUMO

Foram realizados, em laboratório, medidas radiométricas, na faixa espectral de 450 a 1050 nm, em amostras dos materiais de cobertura laterítica de rochas pertencentes aos grupos litoestratigráficos Igarapé Bahia, Igarapé Pojuca e Rio Fresco, da Província Mineral de Carajás. Uma das amostras é constituída de material resultante da intemperização de rochas alteradas hidrotermalmente, nas quais estão hospedados os depósitos sulfetados. Este material constitui-se, geralmente, num forte indicador deste tipo de depósito em climas tropicais. Objetivou-se, com este experimento, a caracterização espectrorradiométrica desses materiais e, em particular, do material derivado por intemperismo das rochas alteradas hidrotermalmente, visando a virtual discriminação espectral deste em relação aos demais.

ABSTRACT

Radiometric measurements within the 450 to 1050 nm wavelength band were taken in laboratory from samples of the lateritic cover rocks belonging to lithostratigraphic groups Igarapé Bahia, Igarapé Pojuca e Rio Fresco, in the Mineral Province of Carajás. One of the samples is composed by weathered debris from sulfide-rich hydrothermally altered rocks. This weathered material is considered a strong surface indicator of sulfide-rich orebodies, in tropical climate. The experiment aimed to characterize the spectral behavior of each laterite sample, specially that one derived from hydrothermally altered rocks, so that this material could be spectrally distinguished from those derived from non-altered rocks.

1. INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto utiliza, basicamente, dados de medidas radiométricas referentes a interações entre energia e matéria, em geral, determinadas pela intensidade de resposta do alvo, em termos de reflectância ou radiância por intervalo de comprimento de onda. Tais interações ocorrem tanto em nível macroscópico, quando são controladas pelas propriedades geométricas do objeto, quanto em níveis atômicos e moleculares, quando são relacionadas com sua composição química, no caso dos minerais, e também com suas fases minerais, no caso das rochas. No nível macroscópico, estão incluídos os efeitos causados pela forma e pela compactação das partículas minerais e pelas micro e macro variações da topografia. Nos níveis atômicos e moleculares, estão presentes as feições de absorção espectral relacionadas ao tipo estrutura cristalina dos materiais, às impurezas iônicas e à simetria interna dos cristais (Meneses, 1986).

No que diz respeito à natureza das rochas (Salisbury e Hunt, 1974 in Meneses, 1986), de-

vem ser considerados alguns fatores importantes na análise e na interpretação dos dados de sensoriamento remoto, a saber: a granulometria da rocha; a ausência de feições espectrais nos minerais constituintes das rochas; os constituintes menores das rochas ou seus minerais de alteração podem dominar o espectro; a absorção atmosférica, em sensoriamento remoto orbital, pode atenuar feições espectrais; a presença de minerais opacos que venham reduzir a reflectância total do alvo, mascarando algumas feições espectrais de interesse.

Define-se assinatura espectral como o conjunto de medidas de reflectância ou radiância de um objeto em que cada medida corresponde ao valor médio em diferentes intervalos de comprimentos de onda (Slater, 1980). Quando essas medidas são feitas sob condições conhecidas ou controladas, obtém-se o comportamento espectral do objeto. Este comportamento, expresso por uma curva espectral característica, reflete as propriedades físico-químicas da substância que

constitui o objeto (Hunt, 1980).

O estudo do comportamento espectral dos materiais rochosos ou dos solos a eles sobrepostos constitui-se numa ferramenta valiosa na identificação e discriminação destes, em campo ou em laboratório, e permite que seus resultados sejam utilizados como um valor de referência na análise de imagens orbitais que tenha como objetivo a identificação ou discriminação de litotipos.

Com base nos aspectos acima discutidos, este trabalho consiste na análise de amostras de solos da Província Mineral de Carajás, objetivando caracterizá-las espectralmente a fim de, comparando suas curvas com as obtidas por Hunt et al. (1971), obter informações físico-químicas de sua composição.

2. PROCESSOS DE INTERAÇÃO DA REM COM A MATÉRIA

Como já foi observado, o comportamento espectral fornece informações sobre as características intrínsecas do objeto estudado. Estas informações são obtidas da análise e da interpretação de feições espectrais, que são evidenciadas por bandas de absorção expressas por depressões ou mudanças na inclinação das curvas espectrais (Hunt et al., 1971) e que permitem diagnosticar aspectos físico-químicos da composição do objeto.

As feições espectrais, em especial as bandas de absorção, devem-se a processos de transição entre níveis de energia e baseiam-se no princípio da mecânica quântica, segundo o qual os elétrons, nos átomos e nas moléculas, só podem existir em níveis discretos e bem definidos de energia. Assim, quando a radiação eletromagnética incide sobre uma substância, parte de sua energia é absorvida na quantidade necessária e suficiente para proporcionar uma transição de um nível discreto de energia para outro mais elevado. Esse mecanismo acarreta numa feição de absorção, que é constatada por variações seletivas nas medidas de reflectância espectral do objeto e é característica da substância que o compõe.

As transições de um nível a outro, características da faixa do visível ao infra-vermelho, são determinadas por dois diferentes processos de interação: os eletrônicos e os vibracionais.

2.1. PROCESSOS ELETRÔNICOS

Esses processos são responsáveis pelas bandas de absorção diagnósticas na curva de reflectância espectral em minerais e em rochas e, por conseguinte, em solos, que ocorrem na porção do espectro compreendida entre o visível até 1200 nm (IV próx.); feições essas essencialmente determinadas pela presença de metais de transição (Goetz et al., 1983).

Os elementos mais comuns nos minerais, tais como silício, alumínio, oxigênio, potássio e cálcio, não possuem níveis energéticos cujas transições possam gerar feições espectrais no visível e no infra-vermelho próximo. Desta forma, não é possível obter informações dos principais constituintes dos minerais. Entretanto, as

modificações dos níveis de energia e, consequentemente das curvas espectrais de alguns íons, tais como o Fe e o Cu, modificações estas provocadas por forças eletroestáticas desenvolvidas na estrutura cristalina, fornecem informações indiretas sobre a composição dos minerais.

Os processos de transição eletrônica podem ocorrer devido a efeitos de campo cristalino ou a transferência de carga. O primeiro deve-se aos efeitos causados pela repulsão de caráter eletroestático sofrida pelo orbital d mais externo dos átomos de metais de transição (Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Zn e particularmente, Fe). O segundo é mais intenso que o anterior, isto é, produz bandas espectralmente mais largas e com maiores amplitudes e ocorre, principalmente, entre os íons ferroso (Fe^{2+}) e férrico (Fe^{3+}) presentes em óxidos e hidróxidos de ferro.

Este tipo de processo tem como feição espectral mais comum uma queda acentuada da reflectância do visível para o ultra-violeta e é particularmente observada no espectro da limonita, onde a migração ocorre entre o ferro e o oxigênio.

2.2. PROCESSOS VIBRACIONAIS

São responsáveis por transições de níveis de energia cujas feições além de 1200 nm são mais intensas que os processos eletrônicos. Com sistemas de vibrações ou de pequenos deslocamentos relativos entre os átomos a partir de suas posições de equilíbrio e são possíveis devido à absorção de radiação infra-vermelha específica para o nível energético de cada ligação.

A quantidade e o tipo de vibrações dependem do número de átomos que compõem a molécula, da sua geometria e da força de ligação entre eles (Hunt, 1977).

As principais bandas de absorção de interesse geológico proporcionadas por este tipo de processo são:

- 1400 e 2300 nm, devido à OH^- ;
- 1400 e 1900 nm, devido à H_2O ;
- 1900, 2000, 2160, 2350 e 2550 nm, devido ao CO_3^{2-} .

Deve-se ressaltar, ainda, que as feições devidas à H_2O e à OH^- são importantes para a discriminação de alguns argilo-minerais, bem como de produtos de alteração hidrotermal (Hunt e Ashley, 1979).

3. GEOLOGIA DA ÁREA

Foi proposta uma coluna lito-estratigráfica para a região de Carajás pelo DOCEGEO (1988) no sentido de uniformizar a nomenclatura para as unidades definidas (Fig.1). Cabe destacar os grupos de onde foram recolhidas as amostras para o presente estudo.

Supergrupo Itacaiúnas

Ocorrendo na Serra dos Carajás, esta unidade tem como característica básica mostrar-se produto de evolução em ambiente vulcano-sedimentar de idade arqueano. Este supergrupo engloba o Grupo Grão Pará, o Grupo Igarapé Pojuca, o Grupo Igarapé Salobo, o Grupo Igarapé Bahia e o

Grupo Buritirama, apresentando graus metamórficos variados.

Grupo Igarapé Pojuca

É representado por rochas vulcânicas básicas e intermediárias e sedimentos clásticos e químicos intercalados, contendo vários depósitos de cobre e cobre-zinco, com ouro e molibdênio associados. Neste pacote vulcano-sedimentar, ocorrem graus metamórficos que variam de xisto-verde a anfibólico. Corpos graníticos correlacionados ao granito Carajás cortam este grupo.

Ainda existem rochas vulcânicas básicas e intermediárias com alteração hidrotermal sem uma qualificação litoestratigráfica apropriada.

Foi coletada uma amostra do pacote vulcano-sedimentar denominada Pojuca Corpo E.

Grupo Igarapé Bahia

Trata-se de uma sequência vulcano-sedimentar de baixo grau metamórfico, com depósitos de cobre de baixo teor e ocorrências polimetálicas a cobre, ouro, molibdênio e magnésio em camadas de formações ferríferas intercaladas.

Neste grupo, foram coletadas duas amostras:

- Bahia Gossan, sobre o gossan com mineralização a ouro e
- Bahia 2, sobre a laterita que capeia o Grupo Igarapé Bahia.

Grupo Rio Fresco

É representado por uma sequência sedimentar clástica transgressiva, cortada por granitos anorogênicos.

Foram coletadas duas amostras sobre a laterita desenvolvida sobre este grupo denominadas Rio Fresco 1 e Rio Fresco 2.

4. MÉTODOS

As amostras foram coletadas em cinco pontos da área da Província Mineral de Carajás. As amostras Bahia 2, Pojuca Corpo E, Rio Fresco 1 e Rio Fresco 2 são constituídas por material proveniente da cobertura laterítica de rochas pertencentes a três grupos lito-estratigráficos: Igarapé Bahia, Igarapé Pojuca e Rio Fresco. Nestas rochas, hospedam-se os depósitos sulfetados de gênese hidrotermal. A amostra Bahia Gossan é composta por material proveniente da camada de alteração supérgena que comumente sobrejaza este tipo de depósito sulfetado.

Fracionadas em quatro intervalos de granulometria (2,00 a 1,00 mm; 1,00 a 0,50 mm; 0,50 a 0,25 mm e menor que 0,25 mm), as amostras foram medidas com o espectrorradiômetro SPECTRON SE-590.

As medidas foram realizadas na faixa espectral de 450 a 1050 nm e discretizadas em intervalos de 3,0 nm. Os fatores de reflectância bidirecional espectral das amostras, fracionadas em seus respectivos intervalos de granulometria, foram calculados pela razão entre os valores das amplitudes correspondentes às medidas destas e os valores de amplitude correspondentes às medi-

das de uma placa de referência de sulfato de bário.

De cada amostra foram geradas quatro curvas do fator de reflectância correspondentes a cada um dos intervalos de granulometria e agrupadas em um único plano (Fig. 2 a 6). De modo semelhante, foram reunidas as cinco curvas espectrais correspondentes ao intervalo de granulometria que compreende a fração mais fina, isto é, o material cujo diâmetro efetivo seja inferior a 0,25 mm (Fig. 7).

5. RESULTADOS

Da análise dos gráficos obtidos (Fig. 2 a 7), foi possível extrair as seguintes informações:

1. Em relação à granulometria

A variação da granulometria não implica, de modo geral, em mudanças significativas na configuração das curvas espectrais, mas variações nos valores de reflectância. Na maioria dos casos verificou-se um aumento de reflectância, correspondente a comprimentos de onda superiores a 650 nm, com a redução da granulometria. Este comportamento é mais facilmente observado a partir de 750 nm. Para comprimentos de onda inferiores a 500 nm, por outro lado, observou-se um comportamento inverso, ou seja, os valores de reflectância são menores para menores granulometrias. Segundo Hunt et al. (1971), este comportamento é típico de minerais transpacos.

Variações desse comportamento geral podem ser observadas em algumas amostras, a saber:

- a amostra Bahia 2 mantém, ao longo de todo o espectro estudado, uma relação inversa entre granulometria e reflectância. Isto pode indicar que esta amostra possui um teor de sílica ou de carbonatos superior às demais; conferindo a este material um comportamento transparente, e não transpaco;

- na amostra Pojuca Corpo E, os intervalos granulométricos intermediários, 1,00 - 0,50 e 0,50 - 0,25 mm, apresentam comportamentos semelhantes, com alguns valores de reflectância coincidentes;

- na amostra Bahia Gossan, a curva correspondente ao maior intervalo de granulometria, 2,00 - 1,00 mm, apresenta um comportamento anômalo, com valores de reflectância superiores àqueles referentes aos intervalos de granulometria intermediários;

- para o menor intervalo granulométrico, mais notável é o aumento da reflectância na faixa espectral em que o material apresenta um comportamento transparente. Este fato corrobora a observação de Bowers e Hanks (1965), em que descrevem este aumento mais acentuado nas granulometrias inferiores a 450 nm, para a caolinita.

2. Com referência à banda de absorção com mínimo em torno de 900 nm

Esta feição é atribuível à presença do íon férrico e está presente nas curvas espectrais de todas as amostras. Estas bandas amplas ocorrem

em geral, entre 810 e 950 nm, com um mínimo de reflectância entre 880 e 915 nm.

Buckingham e Sommer (1983) atribuem esse fenômeno à ocorrência conjunta de hematita e de goethita.

Para a amostra Bahia Gossan, entretanto, essa banda apresenta-se mais aberta, entre 755 e 950 nm, em relação às demais e com o mínimo de reflectância deslocado em direção a comprimentos de onda maiores, entre 920 e 925 nm.

Ainda no trabalho citado, este deslocamento se deve à incorporação de alumínio na estrutura da hematita ou da goethita.

Os autores observaram, também, que em zonas alteradas hidrotermalmente, das quais os gossans são derivados, a incorporação do alumínio se dá na goethita, e não na hematita.

Em Raines et al. (1985), este deslocamento é citado como ocorrendo em gossans verdadeiros; não sendo observados nos falsos.

3. Com referência à banda de absorção com mínimo em torno de 650 nm

Esta feição ocorre, igualmente, em todas as amostras medidas. Buckingham e Sommer (1983) consideraram-na uma banda secundária devido à ocorrência conjunta de hematita e de goethita, indicando um predomínio desta sobre a primeira.

4. Com referência ao decréscimo acentuado da reflectância em direção ao ultravioleta

Deve-se à absorção mais intensa que ocorre em óxidos férricos e se deve a processos de transferência de cargas entre o ferro e o oxigênio. Hunt et al. (1971) e Hunt e Ashley (1979) observaram este fenômeno, destacando que esta queda é evidente em amostras de hematita e de goethita.

5. Em relação a variações no albedo

As curvas apresentam feições espectrais semelhantes para todas as amostras. Entretanto, diferenciam-se relativamente quanto ao albedo.

Considerando-se os valores do fator de reflectância correspondentes ao pico anterior à banda de absorção em torno de 900 nm, têm-se as curvas referentes ao menor intervalo de granulometria assim dispostas, em ordem decrescente em relação ao referido fator: Rio Fresco 1, Bahia 2, Rio Fresco 2, Pojuca Corpo E e Bahia Gossan (Fig. 7).

Essas variações nos albedos podem ser atribuíveis às variações no teor de ferro. Assim, quanto menor o albedo, maior a concentração de ferro na amostra.

Considerando os diversos resultados preliminares, podem-se acrescentar as seguintes observações:

A existência de uma banda, em sensores orbitais, centrada entre 915 e 980 nm seria recomendável para a detecção do deslocamento do mínimo de reflectância da feição de absorção do íon causado pela incorporação do alumínio na es

trutura cristalina da goethita. Este fenômeno ocorre em gossans verdadeiros, que estão associados a sulfetos. Assim, a banda sugerida seria recomendável para estudos de prospecção de depósitos sulfetados.

Devido às limitações espectrais do espectrorradiômetro (450 a 1050 nm), não foi possível observar importantes feições diagnósticas, produzidas por processos de transição vibracionais, que ocorrem acima de 1200 nm.

Com a finalidade de distinguir as diferentes unidades lito-estratigráficas a que pertencem as amostras, a utilização de uma maior quantidade de amostras para cada litologia possibilitaria trabalhar-se com médias, melhorando a confiabilidade dos dados obtidos.

Seria interessante a realização de análises químicas das amostras, com o objetivo de confrontar estes dados composicionais com os obtidos por interferências a partir da análise das curvas espectrais.

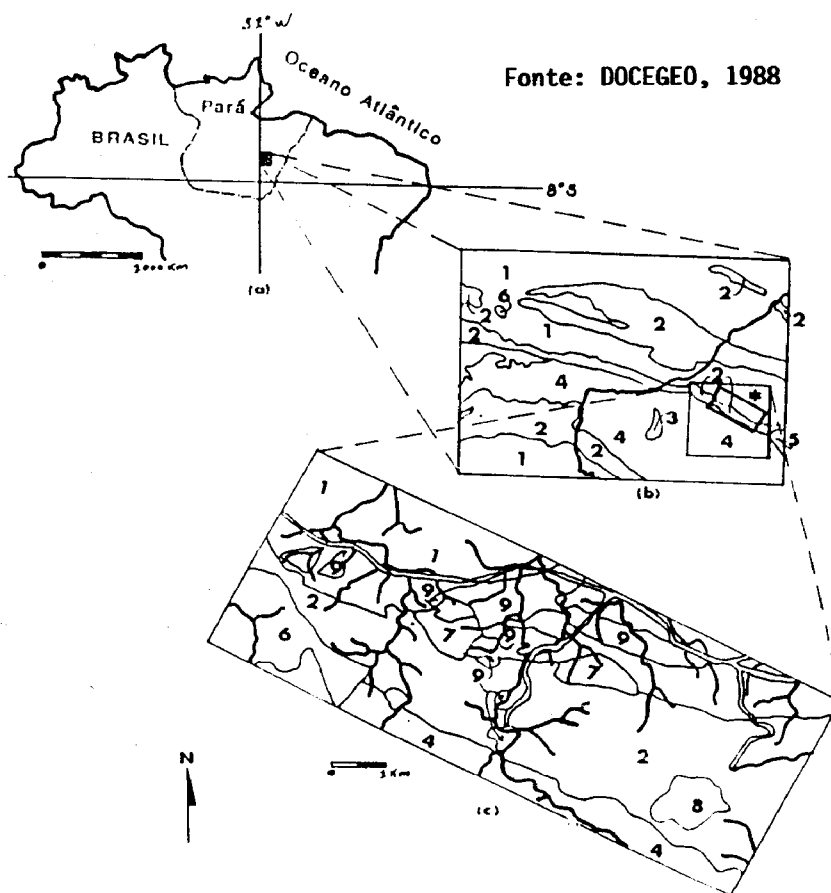
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOWERS, S.A.; HANKS, R.J. Reflection of soils. Soil Science, 100 (2):130-138, 1965.
- BUCKINGHAM, W.F.; SOMMER, S.E. Mineralogical characterization of rock surfaces formed by hydrothermal alteration and weathering - application to remote sensing. Economic Geology, 78 (4): 664-674, 1983.
- DOCEGEO. Revisão lito-estratigráfica da Província de Carajás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35., Belém, 1988. Anexo dos Anais: Belém, CVRD, SBG, 1988. p.11-54.
- GOETZ, A.F.H.; ROCK, B.N.; ROWAN, L.C. Remote Sensing for exploration: an overview. Economic Geology, 78 (4): 573-590, 1983
- HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W.; LENHOFF, C.J. Visible and near infra-red spectra of minerals and rocks: III, oxides and hydroxides. Modern Geology, 2(3): 195-205, 1971.
- HUNT, G.R.; Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. Geophysics, 42(3): 510-513, Apr.1977.
- HUNT, G.R.; ASHLEY, R.P. Spectra of altered rocks in the visible and near infrared. Economic Geology, 74: 1613-1629, 1979.
- HUNT, G.R. Electromagnetic radiation: the communication link in remote sensing. In: SIEGAL, B.S.; GILLSPIE, A. R. Remote Sensing in Geology. New York, John Wiley, 1980. Chapter 2, p.5-45.
- MENESES, P.R. Avaliação e seleção de bandas do sensor "Thematic Mapper" do LANDSAT-5 para a discriminação de rochas carbonáticas do Grupo Bambuí como subsídio ao mapeamento de semidetalhe. Tese de Doutorado. São

Paulo, Instituto de Geociências da USP, 1986.

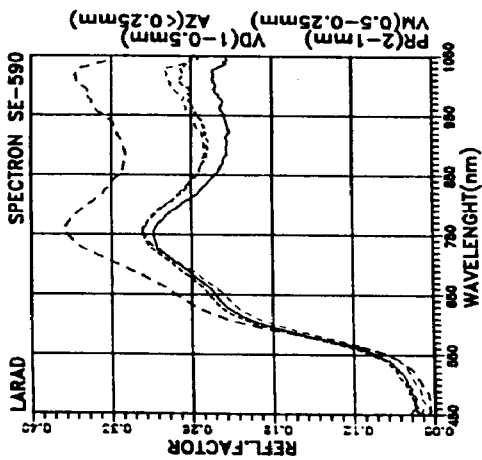
RAINES, G.L.; MCGEE, L.G.; SUTLEY, S.J. Near-infrared spectra of West shasta gossans compared with true and false gossans from Australia and Saudi Arabia. Economic Geology, 80:2230-2239, 1985.

SLATER, P.N. Remote sensing, optics and optical systems. Reading, Addison-Wesley, 1980. 575 p.



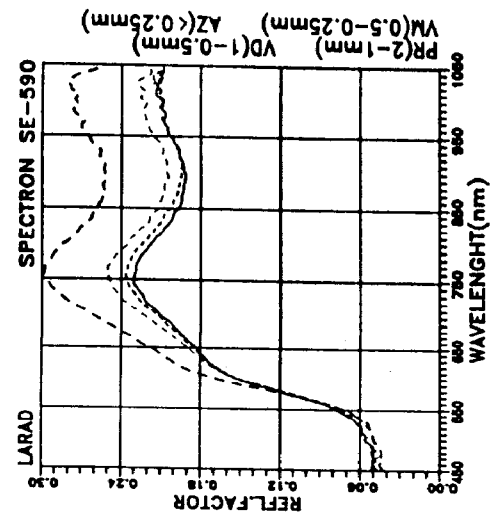
- 3- Grupo Igarapé Pojuca
- 3- Grupo Igarapé Bahia (amostra Bahia C e amostra Bahia Gossan)
- 4- Grupo Rio Fresco (amostras Rio Fresco 1 e 2)
- 9- Crestas lateríticas (amostra Pojuca Corpo E)

Figure 1. Localização da área de estudo e Geologia Regional e de detalhe



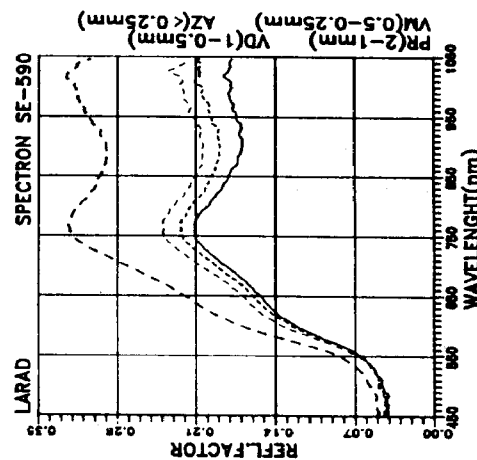
SAMPLE: Rio Fresco 1
 LOCAL: LARAD/INPE
 DATE: 16/11/89
 NOTES: R(45,0)/BaSO4

Fig. 2 Curvas do fator de reflectância bidirecional em função da granulometria da amostra Rio Fresco 1.



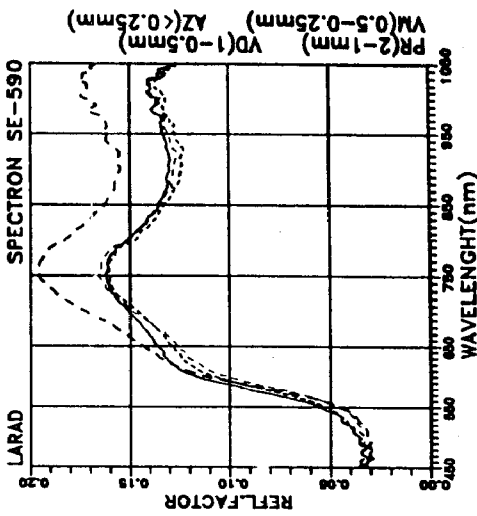
SAMPLE: Rio Fresco 2
 LOCAL: LARAD/INPE
 DATE: 16/11/89
 NOTES: R(45,0)/BaSO4

Fig. 3 Curvas do fator de reflectância bidirecional em função da granulometria da amostra Rio Fresco 2.



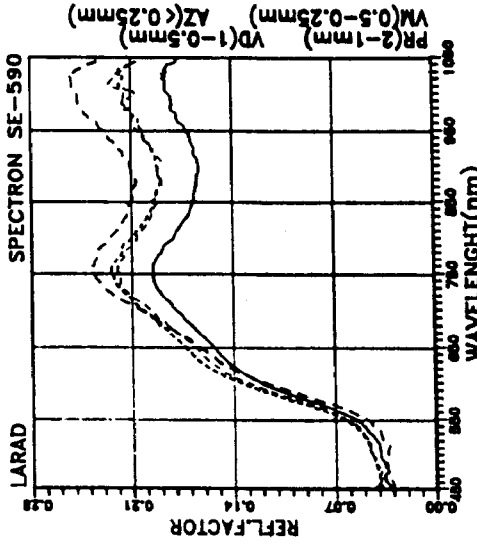
SAMPLE: Bahia 2
 LOCAL: LARAD/INPE
 DATE: 16/11/89
 NOTES: R(45,0)/BaSO4

Fig. 5 Curvas do fator de reflectância bidirecional em função da granulometria da amostra Bahia 2.



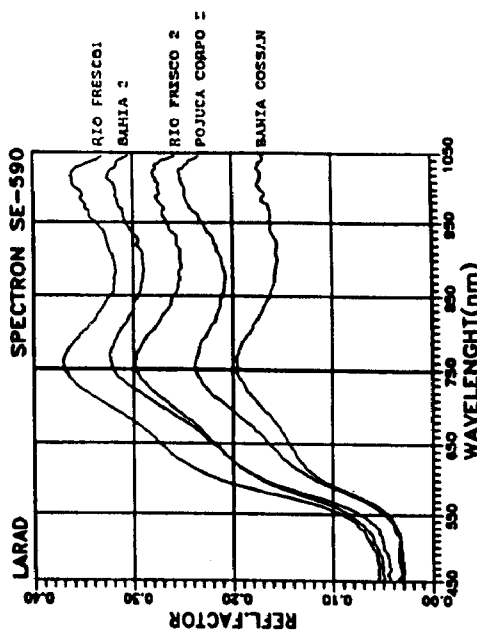
SAMPLE: Bahia - Gossan
 LOCAL: LARAD/INPE
 DATE: 16/11/89
 NOTES: R(45,0)/BaSO4

Fig. 6 Curvas do fator de reflectância bidirecional em função da granulometria da amostra Bahia Gossan.



SAMPLE: Pojuca Corpo E
 LOCAL: LARAD/INPE
 DATE: 16/11/89
 NOTES: R(45,0)/BaSO4

Fig. 4 Curvas do fator de reflectância bidirecional em função da granulometria da amostra Pojuca Corpo E.



SAMPLE: graf. granulom. <0.25mm
 LOCAL: LARAD/INPE
 DATE: 16/11/89
 NOTES: R(45,0)/BaSO4

Fig. 7 Curvas do fator de reflectância bidirecional correspondentes à fração granulométrica inferior a 0,25 mm.