

DETECÇÃO DE DEPÓSITOS BAUXÍTICOS EM COBERTURAS LATERÍTICAS
ATRAVÉS DE IMAGENS TM, SINCLINAL DO
GANDARELA, QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MG.

César Augusto Chicarino Varajão
DEGEO/Escola de Minas/UFOP
Campus - Morro do Cruzeiro - 35400 - Ouro Preto - MG

Paulo Roberto Menezes
Depto. Geociências - UnB
Caixa Postal 70919 - 70910 - Brasília - DF

Adilson Carvalho
IG - USP
Caixa Postal 20899 - 01498 - São Paulo - SP

Adolpho José Melfi
IAG - USP
Caixa Postal 30627 - 01051 - São Paulo - SP

Bruno Boulangé
ORSTOM - IG - USP
Caixa Postal 20899 - 01498 - São Paulo - SP

RESUMO

Em vários pontos das superfícies de aplainamento cimeiras da região do Quadrilátero Ferrífero (MG) ocorrem pequenos depósitos de bauxita, que pelas suas reduzidas dimensões e associação com solos lateríticos e couraças ferruginosas, são de difícil caracterização em fotos aéreas 1: 25.000. Considerando que o sensor TM possui bandas espectrais que favorecem a identificação de óxidos de ferro como limonita, goethita, hematita e de minerais contendo íons hidroxila ou com ligação Al-OH (banda 7), utilizou-se de técnicas de realce para se tentar detectar e discriminar as ocorrências bauxíticas dos outros alteritos. Os resultados comprovaram que as melhores discriminações dos depósitos foram obtidas quando no processamento estava incluída a banda 7 (2,08-2,35 μ), cujo intervalo espectral contém típicas feições de absorção de materiais aluminosos. Neste caso, confirma-se que o atributo da resolução espectral das imagens TM superou o atributo da resolução espacial das fotos aéreas pancromáticas.

ABSTRACT

It is frequently in the region known as "Quadrilátero Ferrífero" the presence of small platos with small occurrence of bauxite deposits associated with ferruginous laterites and aluminou-ferruginous soils, wich are not discrminated in aerial photos 1: 25.000. Since the TM sensor combines spectral bands that are profitable to discriminate iron oxides and OH or Al bearing minerals, it was utilized in the present work, enhancement techniques to obtain the discrimination of bauxites deposits from the other materials. The results have showed that the best discriminations were obtained in the enhacement imagens was present the band 7 (2,08-2,35 μ), which spectral interval coincide which typical absortion bands of aluminou materials. The only enhancement technique that permitted to discriminate the three kinds of materials was the principal component.

1. INTRODUÇÃO

Os intervalos espectrais das bandas TM cobrem uma série de feições de absorção que espectralmente caracterizam diversos minerais contendo óxidos ou hidróxidos férrico e ferroso, argilo minerais com íons hidroxila, ou ainda contendo íons Al-OH. Aqueles com óxidos de ferro podem ser identificados nas bandas TM de menores comprimentos de onda, como a 4, 3 e 1, enquanto os argilo minerais o são na banda 7. Porém, o comum interrelacionamento dos processos e formas de ocorrências destes tipos de materiais e a generalizada alteração fenológica sob as condições tropicais, podem desfavorecer as possibilidades de suas separações ou discriminação. Nesse caso haverá a necessidade de se usar meios que permitam ressaltar qualquer sutil diferença espectral que ocorra numa ou outra banda. O recurso das técnicas de realce de imagem é a melhor técnica disponível para essas situações, pois permite extrair de um conjunto de bandas TM informações espectrais seletivas dos materiais que se queira discriminar, e agrupá-las numa única imagem, onde as suas relações espectrais podem ser analisadas. O resultado da discriminação estará dependente do conhecimento para a seleção do conjunto de bandas a serem realçadas e de como saber combiná-las. Uma análise neste sentido foi conduzida no presente trabalho, com o objetivo de verificar o desempenho espectral das imagens TM para a detecção de depósitos de bauxita e suas discriminações das couraças ferruginosas e solos alumino-ferruginosas.

Dentre as áreas potencialmente favoráveis ao desenvolvimento do estudo proposto, a área escolhida corresponde ao topo aplainado da crista da Serra da Água Limpa, Sinclinal do Gandarela (Figuras 1 e 2). Trata-se de um pequeno segmento (2,5 Km x 500 m) de uma superfície de aplainamento com ligeira ondulação, que trunca as litologias do Grupo Itabira, representado predominantemente por itabiritos. A vegetação é de pequeno porte, destacando-se a presença de gramíneas e velosiãseas (canela de ema). Tal condição confere a área excepcional potencialidade para aplicações com imagens, uma vez que, minimizada a influência da vegetação, a radiação medida pelo sensor relaciona-se predominantemente com as formações superficiais.

ciais.

Num rápido mapeamento das formações superficiais, realizado anteriormente a fase de análise das imagens TM, identificou-se 3 formações: couraça ferruginosa (canga), couraça aluminosa (bauxita) e solos, cujas composições químicas e mineralógicas encontram-se na Tabela 1. Quimicamente, as três formações superficiais podem ser assim diferenciadas: a couraça ferruginosa por um alto teor de Fe_2O_3 e baixos teores de Al_2O_3 e SiO_2 ; a couraça aluminosa por um alto teor em Al_2O_3 , um baixo teor de sílica e valores intermediários de Fe_2O_3 ; e o solo por alto teor de sílica e valores intermediários de Al_2O_3 e Fe_2O_3 .

Tabela 1 - Composição química e mineralógica das formações superficiais da serra de Água Limpa (MG)

| MATERIAL | Amostra (s) | Al_2O_3 | SiO_2 | Fe_2O_3 | MINERALOGIA |
|----------|-------------|-----------|---------|-----------|--------------------|
| Bauxita | 1 | 43,1 | 2,1 | 2,50 | gibbsita, hematita |
| | 2 | 42,1 | 0,8 | 26,6 | goethita, quartzo |
| | 3 | 45,6 | 1,4 | 20,4 | |
| Canga | 1 | 1,5 | 0,8 | 93,7 | hematita, goethita |
| | 2 | 3,5 | 1,6 | 89,5 | quartzo, gibbsita |
| Solo | 1 | 28,0 | 11,0 | 28,3 | gibbsita, quartzo |
| | 2 | 30,8 | 10,8 | 24,9 | goethita, hematita |
| | 3 | 34,1 | 8,5 | 2,47 | |

A unidade couraça ferruginosa, na maior parte de sua ocorrência é representada por uma couraça isalterítica, ou seja, mantém conservada a estrutura xistosa da rocha mãe (itabirito), que regionalmente recebe a denominação de canga estruturada. Apresenta hematita e goethita como principais constituintes mineralógicos, que somam aproximadamente 90 % de Fe_2O_3 . A unidade couraça aluminosa constituiu-se de uma bauxita ferruginosa (43 % Al_2O_3 e 25 % Fe_2O_3), com gibbsita e hematita como principais constituintes mineralógicos. Em superfície ocorre na forma de corpos contínuos, que podem atingir até 150 m de diâmetro, ou ainda na forma de blocos esparsos espalhados sobre a unidade de solo. Esta por sua vez engloba produtos superficiais inconsolidados, contendo pequenos nódulos.

SERRAS DA ÁGUA LIMPA E GANDARELA
 SINCLINAL DO GANDARELA
 QUADRILÁTERO FERRÍFERO - MG



los de bauxita e/ou canga, dispersos em uma matriz marrom-avermelhada.

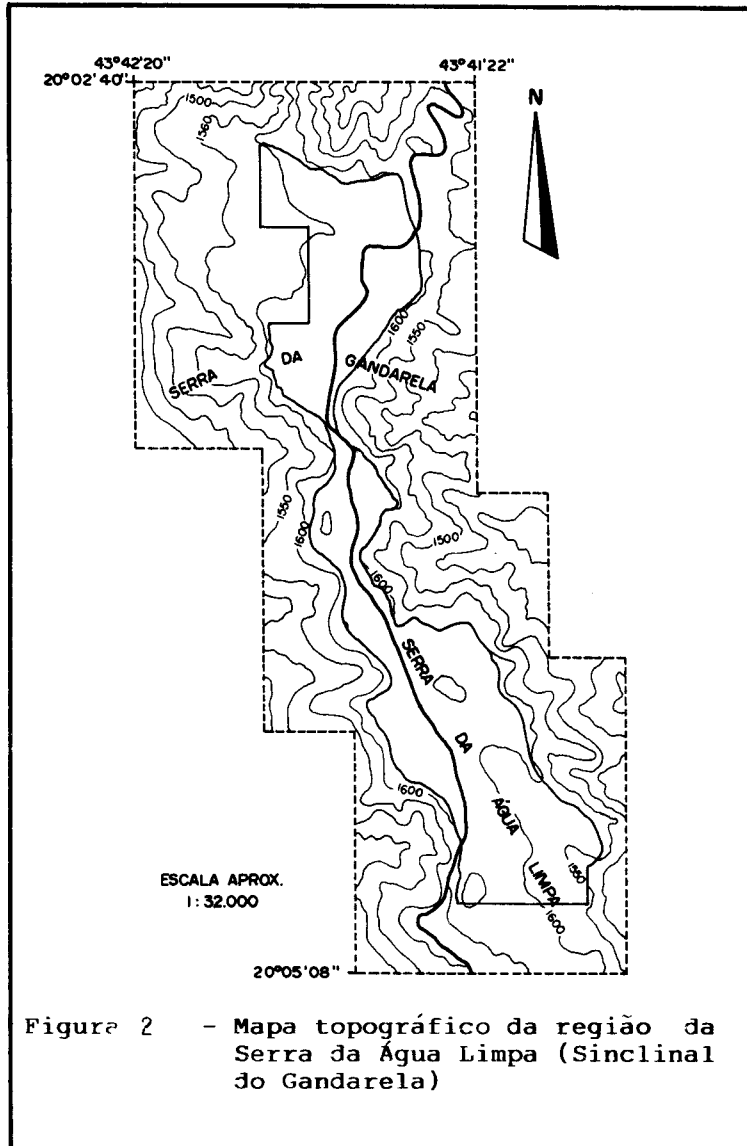
2. A BANDA 7-TM EM RELAÇÃO À DETECÇÃO DE MINERAIS ALUMINOSOS

A banda 7 do TM, também conhecida como banda geológica, abrange um intervalo espectral da região, infravermelha refletida ($2,08$ a $2,35\mu$) que tem se comprovado pelas medidas espectralométricas de laboratório, como a mais importante para a detecção de minerais formadores de depósitos minerais, sobretudo aqueles originados de alterações hidrotermais. Isso a despeito dos espectros de reflectância bidirecional obtidos por Hunt *et al.* (1971, 1973), para uma grande quantidade de minerais e rochas, determinarem que as mais intensas bandas de absorção dos minerais nesta região de $2,0$ a $2,5\mu$, são devidas quase que exclusivamente à presença de grupos OH^- e ligações com H^+ (água física ou quimicamente adsorvida), além do radical CO_2^{--} . Para metais, a exceção fica para o alumínio e o magnésio os quais apresentam feições espectrais de considerável interesse, em muito similares às bandas de hidroxilas dos argilominerais de alteração hidrotermal.

De acordo com Hunt *et al.* (1971) a reflectância do mineral dioctaedral gibbsita $|\text{Al}(\text{OH})_3|$ obtida de amostras de depósitos bauxíticos do Brasil, mostra

a mais notável banda vibracional da ligação Al-OH próximo a $2,27\mu$, portanto dentro do intervalo espectral da banda 7-TM. Contudo, outros minerais também exibem próximo a esse comprimento de onda ou no intervalo de $2,08$ a $2,35\mu$ da banda 7, feições espectrais igualmente semelhantes à gibbsita. Caolinita, montmorilonita e muitos filossilicatos são os exemplos de minerais mais comuns, embora suas intensas bandas de absorções centram-se em torno de $2,20\mu$. Obviamente uma resolução espectral de 170nm da banda 7 não é hábil para discriminar a gibbsita destes outros minerais. Porém, não se quer dizer ser impossível detectar depósitos aluminosos, desde que a paragenese de lateritas bauxíticas e bauxitas é formada por caolinita $|\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8|$, hematita-goethita (ambos com bandas no visível e infravermelho próximo) gibbsita e boemita $|\text{AlO}(\text{OH})|$.

Outra circunstância em que alguma confusão espectral entre bauxita e outras rochas alteradas pode ocorrer, é se o sítio octaedral de argilominerais ou filossilicatos for ocupado por Mg^{2+} ao invés de Al^{3+} , desde que uma banda de absorção similar à de Al-O-H seria produzida próximo a $2,30$ - $2,35\mu$ (Hunt & Salisbury, 1970). Felizmente, as argilas aluminosas são materiais muito mais comuns na superfície terrestre enquanto que argilas magnésicas são principalmente encontradas em rochas máficas



alteradas.

Tratando-se de analisar a possível detecção de depósitos bauxíticos em imagens TM. Também deve-se considerar a resolução espectral que tais sistemas sensores possuem. A relação resolução espectral versus resolução espacial assume fator decisivo sobre o limite da detecção de corpos mineralizados de pequena dimensão, como são os depósitos de bauxitas da área em estudo, neste caso torna-se necessário o uso de técnicas de realce digital de imagens no sentido de procurar realçar o máximo possível, o contraste espectral entre os alvos, numa escala de ampliação compatível.

3. ANÁLISE E PROCESSAMENTO DE IMAGENS

O objetivo do uso de técnicas de

processamento de realce de imagens digitais 1: 25.000 foi o de tentar discriminar os depósitos bauxíticos, eminentemente gibbsíticos, dos solos bauxíticos que contêm uma porcentagem de ferro e caulinita e das couraças ferruginosas. Era esperado pelo menos nele encontrar dificuldades na discriminação do último tipo de material em relação aos dois primeiros.

A análise das bandas originais do TM mostrou que banda 4 (0,76-0,90 μ m) é a mais eficiente para diferenciar a couraça ferruginosa dos dois materiais aluminosos, permitindo facilmente traçar seus limites litológicos. Nesta banda, a caracterização espectral do material ferrífero deve-se à banda de absorção da hematita em torno de 0,85 μ m. Já a conhecida abrupta queda de reflec

tância em direção geral ao azul, que os óxidos de ferro apresentam a partir de 0,6µm, não mostrou exercer nas bandas 3, 2 e 1 do TM, feições espectrais que permitissem a identificação da carapaça ferruginosa. Mesmo a tentativa de divisão de bandas como 3/1, houve pouco realce, pelo simples fato dos materiais aluminosos também conterem porcentagens de óxidos de ferro, o que também ocasionaria uma queda de reflectância em direções aos menores comprimentos de onda, numa intensidade que diminui a precisão e confiabilidade de sua separação com a couraça ferruginosa. Visualmente, as duas bandas infravermelhas TM 5 (1,55-1,75µ) e TM 7 (2,08-2,35µ) exibiram altos valores de reflectância para os três diferentes materiais, não se conseguindo perceber na banda 7 valores de reflectância que pudessem ser relacionadas à absorção de Al-OH da gibbsite do material aluminoso. O mais provável é que a largura espectral das bandas TM e a presença de óxidos de ferro nas porcentagens presentes nos aluminos materiais (25 % na couraça bauxítica, 30 % no solo aluminoso-ferruginoso), contribuem para reduzir a intensidade das bandas Al-OH, como sugerem os espectros de reflectância de laboratório de solos e couraças bauxíticas determinadas por Bildgen *et al.* (1984). Reduzidas em suas intensidades, tais bandas de absorção passam a ser imperceptíveis visualmente, embora seja perfeitamente notado nas curvas espectrais de Bildgen *et al.* (1984), que os materiais bauxíticos ricos em hematita possuem na região de 2,0 a 2,3µ absorção menos acentuada do que os materiais ricos em gibbsite.

Para tentar realçar esta sutil diferença espectral fez-se uma razão de bandas 5/7, associando-a numa composição colorida com as razões 3/1 e 5/4, a última para enfatizar áreas não vegetadas de vegetadas, desde que a canga ferrífera é desprovida de vegetação. O resultado foi a discriminação de duas cores. Uma quase branca que relaciona-se indistintamente aos materiais aluminosos e rochas regionais de relevo acidetado, uma cor ciano-azul relacionado às carapaças ferruginosas. Correções de valores digitais das bandas 5 e 7 para eliminar ambiguidades na razão 5/7, causadas por corpos d'água e sombreamentos, como sugerido por Podwysocki *et al.* 1985, foram testadas, mas não resulta-

ram em melhoria significativa para a discriminação dos materiais presentes no platô.

Os melhores resultados para discriminação dos depósitos de carapaças bauxíticas ricas em gibbsite foram conseguidos com a técnica de realce de componentes principais, sempre que nas combinações de 4 bandas estivesse incluída a banda 7 original ou com a razão 5/7. Esta técnica tem como princípio gerar novas imagens, ou novos componentes que eliminam a redundância de informação das imagens originais, maximizando na 1ª componente a variância da informação total. Infelizmente, devido a impossibilidade de publicações de fotos coloridas nos anais, os resultados são mostrados no mapa de interpretação da Figura 3. Neste mapa, o resultado da combinação das bandas TM 2, 4, 5 e 7, mostra uma melhor correlação com os dados de campo, uma vez que permite a discriminação das três unidades mapeadas. Cabe ressaltar que neste mapa as áreas bauxíticas ocupam sempre uma área maior que as respectivas ocorrências de carapaças bauxíticas verificadas no campo. Este fato é explicado pela grande quantidade de blocos e nódulos de bauxita espalhados sobre os solos aluminoso-ferríferos, nas proximidades dos limites destas duas unidades. É comum ocorrer isso nas jazidas aluminosas do Quadrilátero Ferrífero, pois comumente elas apresentam um horizonte nodular superficial, oriundo de transformações a partir de uma fácies de minério compacto. Durante a evolução de um perfil couraçado, através de mecanismos de diferenciação geoquímica, ocorrem transformações da base para topo e sobretudo lateralmente, de facies menos evoluídas para facies mais evoluídas (que sofreram um maior número de transformações). O solo, quando recoberto parcialmente, com os blocos e nódulos de bauxita representar a porção lateral mais evoluída, mas que espectralmente está mais próximo da couraça bauxítica do que do solo aluminoso-ferruginoso *sensu strictu*.

CONCLUSÕES

Considerando que com as aplicações de realces de imagens digitais foi possível discriminar depósitos bauxíticos de pequena dimensão, pode-se afir-

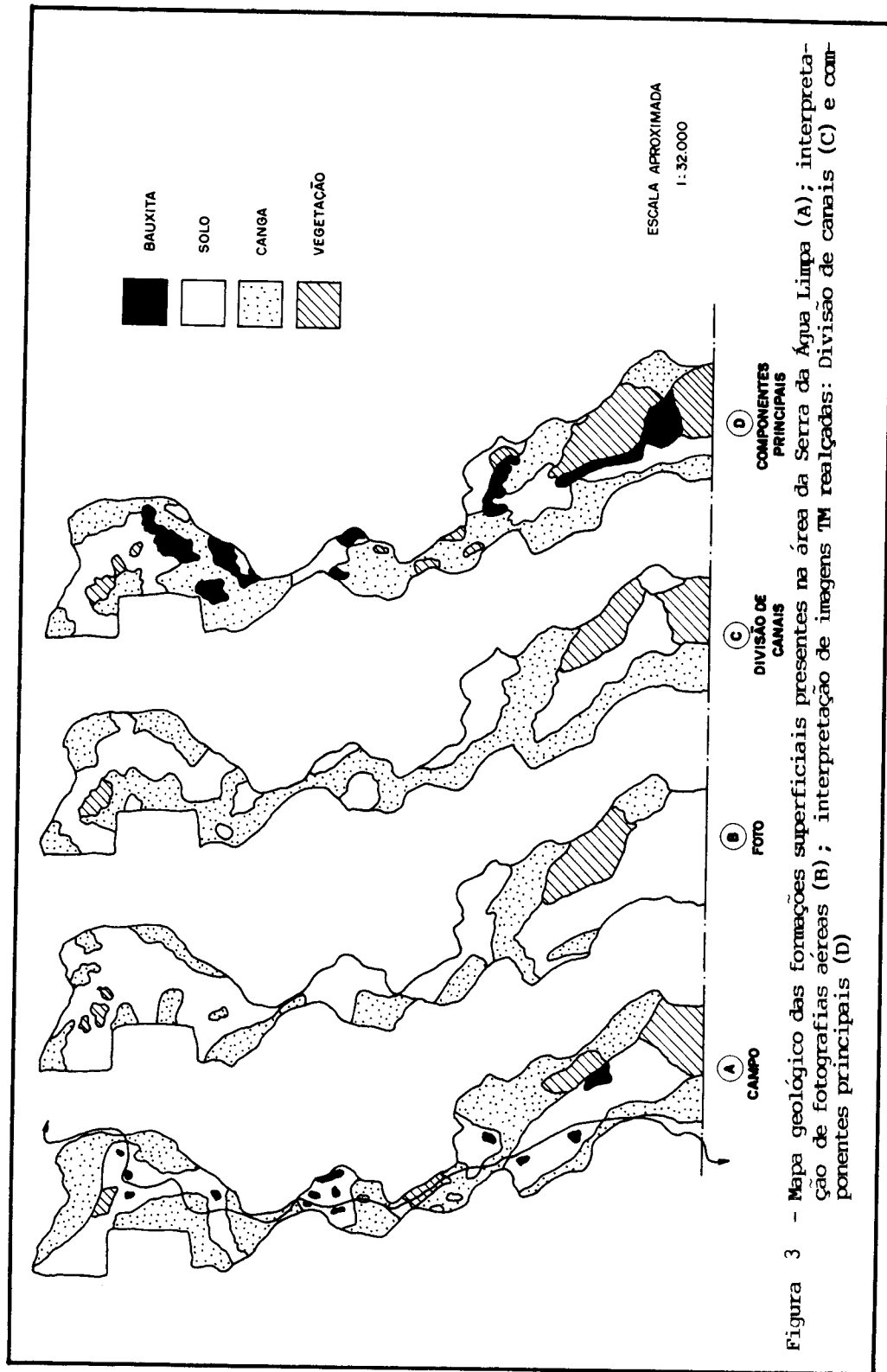


Figura 3 - Mapa geológico das formações superficiais presentes na área da Serra da Água Limpa (A); interpretação de fotografias aéreas (B); interpretação de imagens TM realçadas: Divisão de canais (C) e componentes principais (D)

mar que as imagens TM, e mais especificamente, a banda 7 infravermelha, possuem uma resolução espectral satisfatória para a detecção de bandas de absorção Al-OH e, conseqüentemente, para prospecção de jazidas de bauxita de pequeno porte. Das técnicas de realce testadas - composições coloridas de bandas originais, composições de divisão de bandas e componentes principais -, a última foi a que forneceu melhores resultados, desde que sempre na combinação de 4 bandas estivesse presentes a banda 7 original ou em razão de bandas como 5/7.

BIBLIOGRAFIA

- BILDGEN, P.; BOULEGUE, J. Characterization of spectral signatures of aluminous formations (laterites and bauxites). Possibilities of using satellite remote sensing for prospecting for aluminous minerals. 18th Intern. Symp. on R. Sensing of Environment, Paris, France, October 1984 p. 1383-1392. 1984
- HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W. Visible and near-infrared spectra of mineral and rocks: I. Silicate minerals. Modern Geology; 1: 283-390, 1970.
- HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W.; LENHOFF, C. J. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: III Oxides and hydroxides. Modern Geology; 2: 195 - 205. 1971
- HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W.; LENHOFF, C.J. visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: IV Additional silicates. Modern Geology; 4: 85-106. 1973
- PODWYSOCKI, M.H.; POWER, M.S.; JONES, O.D. Preliminary evaluation of the Landsat-4 thematic mapper data for mineral exploration. Adv. Space Res. 5: 13:20. 1985