

ANÁLISE DOS PARÂMETROS RESPONSÁVEIS PELAS VARIÇÕES DAS CONDIÇÕES DE ILUMINAÇÃO NOS DADOS LANDSAT

R. Rosa
Instituto de Pesquisas Espaciais
Ministério da Ciência e Tecnologia
Caixa Postal 515, 12201-São José dos Campos, SP, Brasil

E.E. Sano
Companhia Baiana de Pesquisa Mineral
Centro Administrativo da Bahia
40000 - 4ª Avenida s/n - Salvador, BA, Brasil

RESUMO

As variações nas tonalidades (produtos fotográficos em papel) ou nos valores digitais (fitas compatíveis com computador - CCTs) dos dados Landsat estão relacionadas ao comportamento espectral dos alvos, condições atmosféricas, geometria de tomada de medidas e às condições de iluminação, este último analisado no presente trabalho. Os parâmetros que influenciam as condições de iluminação são as relações geométricas entre o sistema sensor, o Sol (ângulos solares de elevação e azimute) e o relevo (orientação e inclinação). Estes parâmetros são aqui definidos e discutidos, bem como as suas implicações nos dados Landsat.

ABSTRACT

The sun-sensor geometry which is analysed in this paper provokes variations of tonality (analogical products) or variation of digital counts (CCTs) as well as the spectral signature of the objects and the atmospheric conditions. The parameters that have an influence on the illumination are the sun-sensor geometry (sun and sensor elevation and azimuthal angles) and the surface orientation and topography. These parameters and their consequences on the Landsat data are presented and discussed.

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar e discutir os parâmetros responsáveis pelas variações das condições de iluminação da cena, uma vez que estas variações apresentam reflexo direto nos dados Landsat, como por exemplo tonalidades (produtos fotográficos em papel) ou nos valores digitais (fitas compatíveis com computador - CCTs). Estes dados dependem também das condições atmosféricas, geometria de tomada de medidas e ao próprio comportamento espectral dos alvos.

As variações das condições de iluminação são aquelas provocadas pelas variações de azimute e elevação solar e/ou orientação e inclinação topográfica. Esses elementos são aqui analisados, mostrando o seu comportamento durante o ano e suas implicações em sensoriamento remoto.

Tópicos abordando este assunto podem ser encontrados em Gardner e Miller (1977), Verstaapen (1977), Barzegar (1979), Robchevsky (1979), Novo (1980 e 1983) e Veneziani (1980). Liu et alii (1980) salientam a importância de considerar as condições de elevação e azimute solar no processo de seleção de imagens.

Atualmente, verifica-se uma crescente preocupação com a avaliação dos efeitos de iluminação na superfície, uma vez que, apesar da órbita heliossíncrona, as diferentes passagens do Landsat sobre uma mesma região ocorre com o Sol ocupando distintas posições relativas ao alvo. Por exemplo, em áreas montanhosas, a elevação e azimute solar influem fortemente na acurácia das classificações temáticas.

2. COLOCAÇÃO DO PROBLEMA

A radiância (R) registrada por um sistema sensor de um satélite pode ser representada pela seguinte relação (Kowalik et alii, 1978):

$$R = \frac{S \tau \rho E}{\pi} + S R_t \quad (1)$$

onde S é o fator de ganho de uma banda do satélite; τ é a transmitância da atmosfera; ρ é a reflectância dos alvos da superfície; E é a irradiância na superfície e R_t é a radiância de trajetória (efeito aditivo resultante do espalhamento atmosférico, situada entre a superfície e o satélite).

Os diferentes valores digitais ou tonalidades de cinza encontrados em uma determinada banda do Landsat para um mesmo alvo e numa mesma data e horário de tomada de dados são explicados pela variação da irradiância na superfície. Neste caso, os parâmetros S, T, ρ e R_t são constantes.

A irradiância na superfície varia em função da:

- 1) Variação anual do ângulo de elevação e azimute solar (variação sazonal), que ocorre devido à variação da declinação solar; esta por sua vez é função da inclinação (de 23°27') do eixo de rotação terrestre em relação ao plano de órbita da Terra ao redor do Sol.
- 2) Variação da distância Terra-Sol durante o ano, provocada pela órbita elíptica da Terra e responsável pela variação $\pm 2\%$ na irradiância.

3) Inclinação e orientação da superfície em relação à fonte de irradiação, para superfícies não horizontais.

Para uma melhor compreensão da influência destes parâmetros (declinação solar, distância Terra-Sol, orientação e inclinação da superfície) na irradiação de uma superfície, é necessário obter a posição do Sol na esfera celeste em um dado instante. Essa identificação de posição e hora é dada pelos sistemas de referência e tempo. Basicamente estes sistemas fundamentam-se em coordenadas polares, e dentre os vários sistemas, o de coordenadas horizontais e o de coordenadas equatoriais ou horários são os mais importantes para os propósitos deste estudo.

3. SISTEMA DE COORDENADAS HORIZONTAIS

No sistema de coordenadas horizontais, o plano fundamental é o horizonte e as coordenadas esféricas recebem o nome de Altura (h) e Azimute (A) (Figura 1).

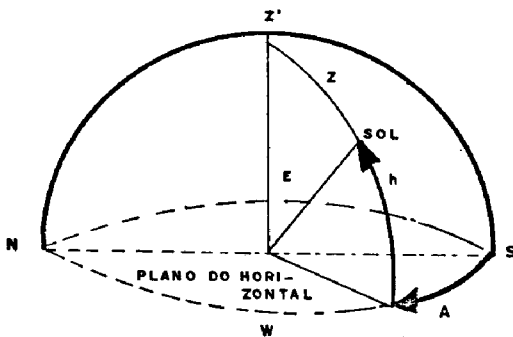


Fig. 1 - Sistema de coordenadas horizontais.

Altura (h) é a elevação de um astro acima do plano do horizonte, ou seja, é o arco do círculo vertical que passa pelo astro compreendido entre a linha do horizonte e o referido astro, no caso deste trabalho, o Sol. Se o Sol estiver situado no horizonte ou zênite (Z'), as suas alturas serão respectivamente zero e 90° . É comum substituir a altura (h) pelo seu complemento, isto é, o afastamento de um astro em relação ao zênite (Z'), chamado de "distância zenital (Z)". Tem-se então $h + Z = 90^\circ$, ou ainda, $Z = 90^\circ - h$.

Azimute (A) é o arco do horizonte compreendido entre o ponto cardeal sul e o círculo vertical que passa pelo Sol. Expresso em unidades de arco, é contado a partir do ponto cardeal sul no sentido SONE, ou seja, um astro no ponto sul, oeste, norte e leste tem respectivamente 0° , 90° , 180° , 270° de azimute.

As coordenadas do sistema horizontal são locais, ou seja, a altura e o azimute do Sol no mesmo instante, variam de um lugar para outro, uma vez que variam o horizonte e o meridiano do astro.

4. SISTEMA DE COORDENADAS EQUATORIAIS OU HORÁRIAS

A fim de simplificar o estudo dos astros, define-se um sistema de referência no qual pelo menos uma das coordenadas do astro permanece constante ao longo do seu movimento; surgiu assim, o Sistema de Coordenadas Horárias ou Equatoriais. O plano fundamental é o equador celeste (Figura 2) e as coordenadas esféricas neste sistema recebem a denominação de Declinação (δ) e Ângulo Horário (H).

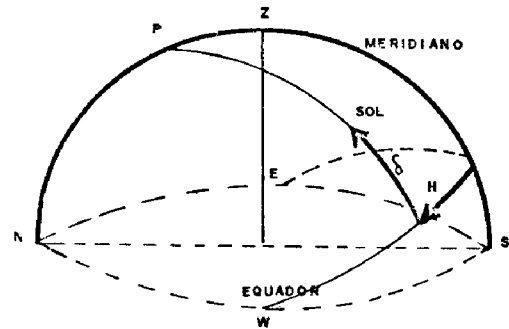


Fig. 2 - Sistema de coordenadas equatoriais.

Declinação (δ) é o arco do círculo horário que passa pelo Sol, compreendido entre o equador celeste e o Sol. Qualquer astro situado sobre o equador celeste possui declinação 0° . O sinal negativo é tomado quando o astro encontra-se no hemisfério sul e positivo quando no hemisfério norte.

A declinação do Sol varia de $-23^\circ 27'$ (solstício de verão) a $23^\circ 27'$ (solstício de inverno), sendo que declinação nula é obtida por ocasião dos equinócios (outono e primavera).

Ângulo horário (H) é o ângulo formado entre o meridiano local e o meridiano celeste que contém o Sol, contado sobre o plano do equador, no sentido retrógrado, variando de 0° (no meridiano local) a 360° . O mais usado é medi-lo em horas (0 - 24 horas). Quando a contagem for para leste, adota-se o sinal negativo e quando para oeste, o sinal positivo.

O sistema horário, em relação ao horizontal, oferece maiores vantagens, uma vez que a declinação do astro em um curto espaço de tempo é invariável e o equador celeste é o mesmo para todos os observadores.

5. CÁLCULO DA ELEVACÃO, AZIMUTE E DECLINAÇÃO SOLAR

Para se determinar o azimute, elevação e declinação solar, sobrepõem-se os dois sistemas de coordenadas anteriormente descritos (Figura 3) e através da formação de um triângulo astronômico esférico (Figura 4) e a partir de equações de trigonometria esférica, pode-se calcular tais parâmetros.

5.1. CÁLCULO DA ELEVAÇÃO SOLAR

A partir do triângulo astronômico chega-se à seguinte equação:

$$\cos Z = \frac{\sin(90-\phi)\sin(90-\delta)\cos H + \cos(90-\phi)\cos(90-\delta)}{\cos H} \quad (2)$$

Simplificando, pode-se expressar da seguinte forma:

$$\cos Z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos H \quad (3)$$

Como

$$h = 90^\circ - Z \quad (4)$$

Pode-se então calcular a elevação solar por:

$$h = 90^\circ - \arccos(\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos H) \quad (5)$$

onde Z é a distância zenital do Sol; δ é a declinação do Sol; ϕ é a latitude do ponto de interesse; H o ângulo horário do Sol e h é a elevação do Sol.

A variação da elevação solar durante os meses do ano, no horário da passagem do satélite (9:45h) para as latitudes 10° , 20° e 30° S é mostrada na Figura 5.

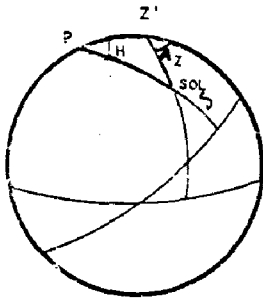


Fig. 3 - Representação dos dois sistemas de coordenadas horizontal e equatorial.

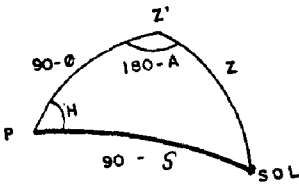


Fig. 4 - Representação do triângulo astronômico esférico.

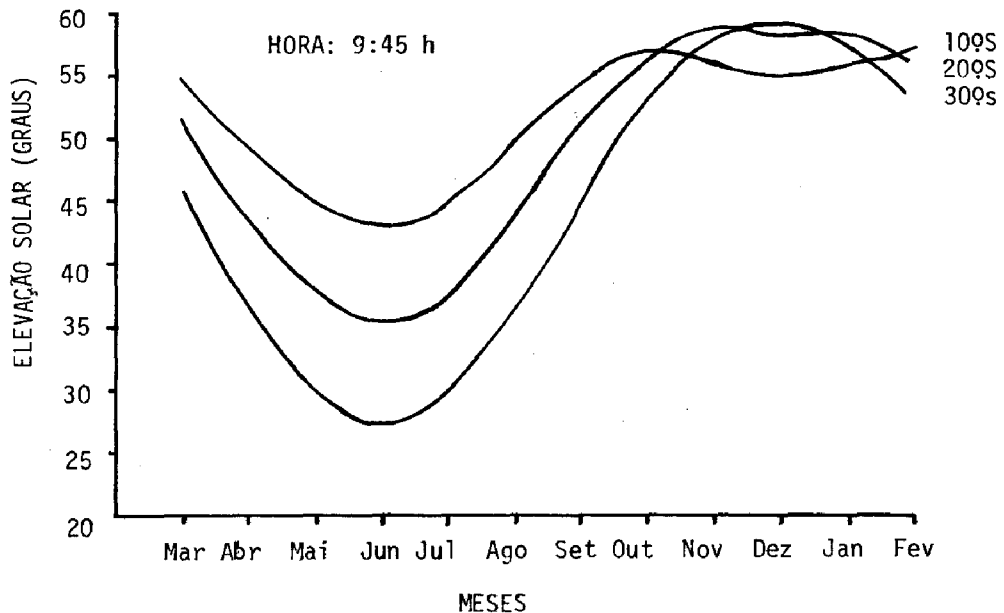


Fig. 5 - Variação da elevação solar durante os meses do ano.

5.2. CÁLCULO DO AZIMUTE SOLAR

Também a partir do triângulo astronômico, chega-se à seguinte equação:

$$\cos(90-\delta) = \sin(90-\phi) \sin Z \cos A_0 + \cos(90-\phi) \cos Z \quad (6)$$

Simplificando, pode-se expressar da seguinte forma:

$$\sin \delta = \cos \phi \sin Z \cos A_0 + \sin \phi \cos Z \quad (7)$$

Pode-se então calcular o azimute solar por:

$$\cos A_0 = \frac{\sin \delta - \sin \phi \cos Z}{\cos \phi \sin Z} \quad (8)$$

onde A_0 é o azimute do Sol.

O ângulo horário da Equação 2 pode ser encontrado da seguinte forma:

- 1) Achar a diferença em horas e décimos de hora entre 12 e o tempo de interesse (T);
- 2) Multiplicar o resultado obtido no item anterior por 15, para transformar o valor de horas em graus;
- 3) Achar a diferença em graus entre a longitude de interesse e a longitude do meridiano central (no caso do Brasil, as longitudes dos meridianos centrais são 30° , 45° , 60° e 75°);

- 4) Juntar o resultado do item 3 com o resultado do item 2, se a longitude de interesse for para leste da longitude do meridiano central (do centro de longitude) e parte da tarde, ou oeste e pela parte da manhã. Subtrai-se o item 3 pelo item 2 para o caso contrário. O valor final será o ângulo horário (H).

5.3. CÁLCULO DA DECLINAÇÃO SOLAR

Os valores exatos para a declinação solar (δ) podem ser obtidos no Anuário Astronômico do Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo - SP, no Anuário Astronômico do Observatório Nacional - RJ ou ainda no Almanaque Náutico. A sua variação durante os meses do ano é mostrada na Figura 6. Uma boa aproximação pode ser encontrada pela seguinte equação:

$$\sin \delta = \sin i \sin \lambda \quad (9)$$

onde i é a inclinação da elíptica ($23,44^\circ$) e λ a posição aparente do Sol com relação ao equinócio vernal (equinócio vernal = 0°). A fórmula pode ser escrita também da seguinte maneira:

$$\delta = \arcsin (0,3978 \sin (0,9860 d)) \quad (10)$$

onde d é o número de dias decorridos após o equinócio vernal (21/3)

6. IRRADIÂNCIA (E) EM UMA SUPERFÍCIE HORIZONTAL; CONSIDERANDO AUSENTE A ATMOSFERA

Em uma superfície horizontal, o zênite coincide

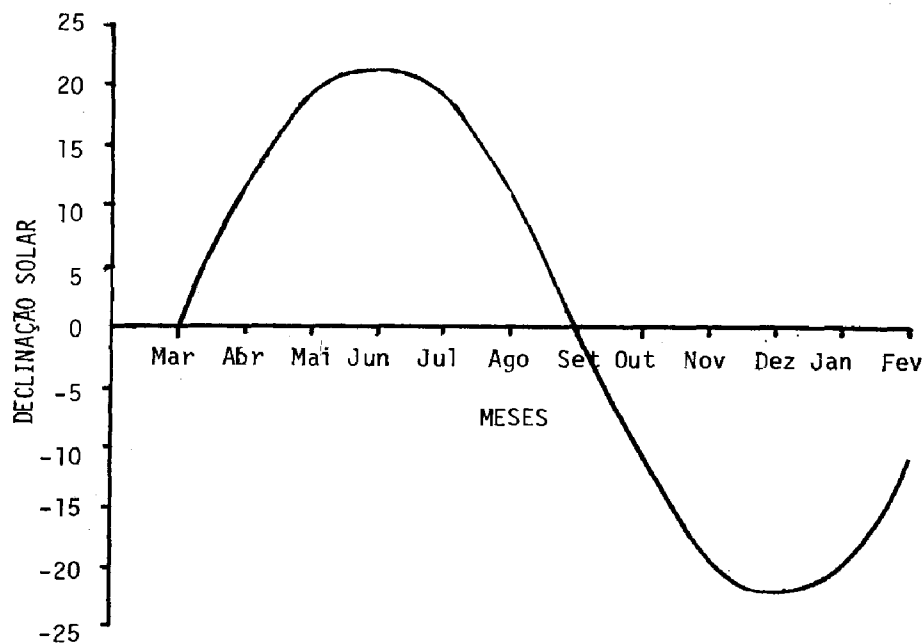


Fig. 6 - Variação da declinação solar durante os meses do ano.

cide com a normal à superfície. Portanto, o ângulo zenital é igual ao ângulo solar e a normal à superfície, ângulo este chamado β .

A irradiância (E) em uma superfície horizontal considerando ausente os efeitos atmosféricos, pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$E = E_0 \cos Z \quad (11)$$

onde E_0 é a constante solar ($E_0 = 1353 \text{ Watt/m}^2$), ou seja, é a irradiância medida em uma superfície perpendicular à radiação direta do Sol, considerando-se uma influência nula da atmosfera e também uma distância Terra-Sol média; Z é a distância zenital (complemento da elevação solar).

Um valor mais preciso de irradiância (E), considerando-se a distância Terra-Sol (r) variável durante o ano pode ser obtido por:

$$E = \frac{E_0}{r^2} \cos Z \quad (12)$$

onde E_0 é a constante solar; Z e r são respectivamente distâncias zenital e Terra-Sol.

7. IRRADIÂNCIA (E_p) EM UMA SUPERFÍCIE COM DIFERENTES ORIENTAÇÕES E INCLINAÇÕES, CONSIDERANDO AUSENTE A ATMOSFERA

Na realidade, a forma mais correta de se calcular a irradiância em uma superfície é considerar o ângulo entre o Sol e a normal à superfície (β), pois o caso descrito anteriormente só é válido para superfícies horizontais, onde $Z = \beta$.

A irradiância incidente em qualquer plano (E_p), inclinado ou não, é dada pela seguinte expressão:

$$E_p = \frac{E_0}{r^2} \cos \beta \quad (13)$$

onde E_0 é a constante solar; r é a distância Terra-Sol e β é o ângulo entre o Sol e a normal à superfície.

O ângulo β é função da distância zenital (Z), do azimute solar (A_0), do azimute da superfície inclinada (A_p) e da inclinação da superfície (I) (Figura 7). A diferença entre o azimute do Sol (A_0) e o azimute da superfície inclinada (A_p) que contém a normal à superfície é chamada de Ad ($Ad = A_0 - A_p$).

As relações entre os vários ângulos pode ser observada na Figura 8.

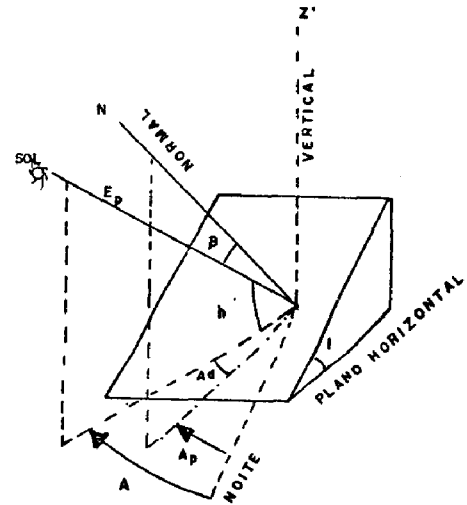


Fig. 7 - Irradiância em uma superfície inclinada.

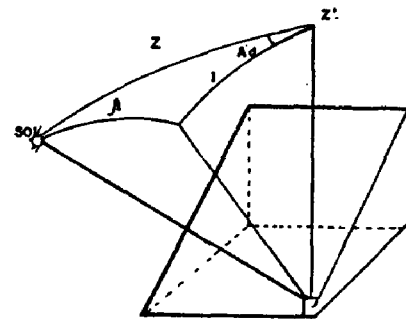


Fig. 8 - Ângulos envolvidos no cálculo da irradiância.

Onde Z' é o zênite; Z é a distância zenital; β o ângulo entre o Sol e a normal à superfície; I a inclinação da superfície; A_p o azimute da superfície inclinada e A_0 o azimute do Sol.

A partir do triângulo formado pelo zênite, normal e Sol, extraído da Fig 8 e representado na Fig. 9, pode-se calcular o valor de β :

$$\cos \beta = \sin Z \sin I \cos Ad + \cos Z \cos I \quad (14)$$

Então, tem-se que:

$$E_p = \frac{E_0}{r^2} \cos \beta \quad (15)$$

A Equação 15 permite calcular a irradiância (E_p) em qualquer superfície, com qualquer orientação, inclinação, azimute e elevação solar considerando ausente a atmosfera.

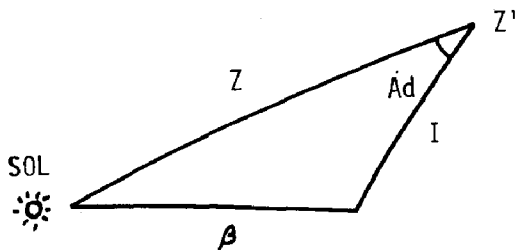


Fig. 9 - Triângulo formado pelos envolvidos no cálculo da irradiância.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Terminadas estas considerações, conclui-se que o sinal registrado pelo sensor é fortemente dependente da latitude, azimute e elevação solar e orientação e inclinação do relevo.

Para uma determinada latitude, o principal fator de variação da irradiância numa superfície plana durante o ano é a variação da declinação solar, uma vez que o satélite Landsat passa aproximadamente no mesmo horário. Esta variação da declinação solar é responsável pela chamada variação sazonal nos dados Landsat. As variações sazonais mais importantes são tão relacionadas às condições de iluminação da área, em função das relações geométricas entre ângulos solares de elevação e azimute e topografia.

Os efeitos de sombreamento nas imagens de verão são mais reduzidos, em relação às de inverno, pois os ângulos de elevação solar são mais elevados.

Além dos ângulos de elevação, outro fator que influi nos efeitos de sombreamento é o perfil e a orientação das vertentes, em relação à direção de iluminação. Se uma determinada feição topográfica orienta-se na direção do azimute solar, ambos os seus lados serão uniformemente iluminados, não aparecendo assim, efeitos acentuados de sombreamento. Se, ao contrário, ela apresentar ângulos distintos de azimute, os seus lados serão diferencialmente iluminados, sendo os efeitos de iluminação tão mais intensos quanto mais frontal a vertente em relação à direção de iluminação.

As imagens tomadas com baixos ângulos de elevação solar (inverno) ressaltam os elementos texturais do terreno, sendo de grande importância, por exemplo, na análise de interpretação fotogeológica, ao passo que as imagens tomadas com altos ângulos de elevação solar (verão) mostram a superfície do terreno mais uniformemente iluminada, o que facilita a análise de comportamento espectral e a classificação automática dos diferentes alvos que integram a paisagem.

O azimute e a elevação solar variam com a estação do ano e latitude, de modo que as diferentes direções de iluminação solar provocam diferentes condições de iluminação para as feições do terreno e, conseqüentemente, diferentes valores de resposta espectral.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARZEGAR, F. Rock type discrimination using enhanced Landsat imagery. *Phot. Eng. and Rem. Sens.*, 3(45):605-610, 1979.
- GARDNER, J.V.; MILLER, V.C. A comparative study of the amount and types of geological information received from visually interpreted V2 and Landsat imagery. *ITC Journal*, 3:384-405, 1977.
- KOWALIK, W.S.; MARSH, S.E.; LYON, R.J.P. The effect of several atmospheric corrections on Landsat 5/4 ratios. *SRSI - Technical Report 78-15*. Califórnia, 1978. 41 p.
- LIU, C.C.; VITORELLO, I.; MENESES, P.R. *Alguns aspectos das informações geológicas contidas em imagens Landsat*. São José dos Campos, INPE, 1980 (INPE-1822-RPE/188).
- NOVO, E.M.L.M. Metodologia de interpretação de dados orbitais (Landsat) em geomorfologia. IN: INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS. DEPARTAMENTO DE SENSORIAMENTO REMOTO. Curso de Treinamento: Aplicações de sensoriamento remoto, com ênfase em imagens Landsat, no levantamento de recursos naturais. São José dos Campos, INPE, 1980, Cap. 5, p. 5.1-5.25 (INPE-1949-MD/006).
- NOVO, E.M.L.M. *Avaliação dos efeitos da variação sazonal do ângulo de elevação solar e azimute sobre processos de filtragem digital e classificação temática do relevo*. São José dos Campos, INPE, 1983, 43 p. (INPE-2858-RPE/440).
- ROBCHESKY, G.A. Landsat geological reconnaissance of the Washington, DC, area westward to the Appalachians. *Photogram. Eng. and Rem. Sens.*, 45(5):611-621, 1979.
- VENEZIANI, P. Metodologia de interpretação de dados orbitais (Landsat) no mapeamento geológico regional. IN: INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS. DEPARTAMENTO DE SENSORIAMENTO REMOTO. Curso de Treinamento: Aplicações de Sensoriamento Remoto, com ênfase em imagens Landsat, no levantamento de recursos naturais. São José dos Campos, INPE, 1980. Cap. 4, p. 4.1-4.16 (INPE-1949-MD/006).
- VERSTAPPEN, H. Th. *Remote Sensing in geomorphology*. Amsterdam. Elsevier. Scientific. 1977.