



Universidade Estadual do Norte Fluminense
"Darcy Ribeiro"
Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias
Laboratório de Engenharia Agrícola - LEAG

Exame de qualificação

**Caracterização de Sensores Orbitais Utilizados pelo Modelo
Surface Energy Balance Algorithm for Land - SEBAL**

Avaliadora: Profa Maria da Glória Alves

Doutorando: José Carlos Mendonça

Campos dos Goytacazes, RJ, Março/2005

1. Introdução

Tradicionalmente, a evapotranspiração (ET) tem sido calculada a partir de medidas de variáveis meteorológicas realizadas em estações meteorológicas. A medida dessas variáveis como, por exemplo, a temperatura do ar e a velocidade do vento, realiza-se de modo pontual, ou seja, nos lugares onde se situam as estações meteorológicas, ou o instrumental destinado a tal propósito (Morgan et al., 1989). Sendo assim, se o objetivo é obter uma avaliação da variação regional da ET, aumenta a incerteza da estimativa ao utilizar métodos de interpolação ou extrapolação dos parâmetros micrometeorológicos na área de interesse.

A fim de evitar ao máximo o uso de variáveis meteorológicas com baixa representatividade regional diversos algoritmos foram desenvolvidos nas últimas décadas com o objetivo de estimar os fluxos de energia na superfície terrestre com base na utilização de técnicas de Sensoriamento Remoto. Alguns destes algoritmos, tais como o modelo simplificado caracterizado pela abordagem empírica (Jackson et al., 1977 e 1981; Seguin et al., 1989 e 1991) e os modelos determinísticos que se baseiam nos processos físicos de transporte de massa e energia com os quais estão acoplados através de algum modelo de interação solo-planta-atmosfera (Courault et al., 1998; Olioso et al., 1999). Existem ainda algoritmos que utilizam abordagens intermediárias e que são caracterizados por modelos semi-empíricos que reproduzem o balanço de energia na superfície (Bastiaanssen et al., 1998a; Kustas et al., 1994).

O método residual do balanço de energia é representado pela equação:

$$\lambda ET = R_n - H - G_o \quad (\text{Eq. 01})$$

Onde: λET é o fluxo de calor latente; R_n é o saldo de radiação; H é o fluxo de calor sensível e G_o é o fluxo de calor do solo, Todas as componentes do balanço de energia são expressas em W, m^{-2} .

Folhes (2004) relata que a equação 01 não se apresentava facilmente aplicável, motivo pelo qual ela foi modificada por Jackson et al, (1977), que propuseram a seguinte equação simplificada:

$$R_n - \lambda ET_{24} = A + B (T_o - T_a) \quad (\text{Eq.02})$$

Onde: R_n é o saldo de radiação diário; λET é o fluxo de calor latente diário; A e B são coeficientes empíricos adimensionais; $(T_o - T_a)$ é a diferença entre as temperaturas instantâneas da superfície (T_o) e do ar (T_a). As unidades são W , m^{-2} e $^{\circ}C$ para os fluxos e temperaturas, respectivamente.

Jackson et al, (1977) sugeriram que medidas de temperatura instantânea do dossel tomadas por instrumentos de radiometria de campo, capazes de detectar a radiação eletromagnética na faixa do infravermelho termal (8-14 μm), combinadas com medidas de temperatura do ar, tomadas das estações meteorológicas, representariam variáveis-chave na verificação do estresse hídrico da cultura do trigo. A Equação 02 supõe que a razão H/R_n é constante ao longo do dia, e que o valor de G_o é zero em uma escala de tempo diária.

De acordo com Jackson et al, (1977), a premissa da equação simplificada está fundamentada na idéia de que o estresse hídrico causa uma elevação da temperatura foliar da cultura, resultado da diminuição do resfriamento evaporativo da superfície foliar, o que, por sua vez, é causado pela diminuição da ET. Tal variação de temperatura pode ser detectada por sensores termais em diferentes níveis de percepção (local, regional ou global). Esta abordagem considera que as diferenças de temperatura entre a superfície e o ar, adquiridas ao meio-dia, são linearmente relacionadas com as diferenças entre a ET diária e o saldo de radiação, também diário.

Segundo Menenti (2000), a equação simplificada representa o marco fundamental de um processo de constante desenvolvimento de métodos de detecção remota da ET, com base na concepção do balanço de energia na superfície. A Eq. 02 continua sendo revisada e modificada para que seu uso alcance uma maior operacionalização. Neste sentido, se destacam os modelos elaborados e/ou aplicados por Jackson et al, (1981) e Seguin et al, (1989, 1991) para determinar a ET regional.

Os modelos empíricos descritos foram desenvolvidos diante da perspectiva de compreender e explorar as relações espectro-agronômicas. Apesar da simplicidade, os mesmos exigem um grande esforço metodológico para se tornarem operacionais. É o caso das imagens orbitais do espectro do infravermelho termal que antes de serem transformadas em valores instantâneos de T_o devem ser corrigidas dos efeitos da emissividade da superfície e da absorção atmosférica, os quais representam os principais condicionantes externos à medição da temperatura radiante de dossel. Ambos os

condicionantes influenciam a qualidade da informação extraída das imagens e podem conduzir a erros significativos caso seus efeitos não sejam satisfatoriamente corrigidos.

Além disso, dados espectrais orbitais correspondentes às faixas do visível e infravermelho, usados para compor o índice de vegetação, são frequentemente disponíveis numa resolução espacial mais detalhada em comparação com a resolução encontrada nos dados de temperatura radiante, o que implica na definição de regras precisas para integrar os dados de diferentes resoluções. Por último, a baixa resolução temporal aliada ao eventual comprometimento das imagens de satélites, devido à cobertura de nuvens, limita até certo ponto o atendimento dos objetivos operacionais na maioria das agências de gerenciamento dos recursos hídricos, quando da utilização de imagens de média resolução espacial de satélite, tais como Landsat, Spot e CBERS.

Uma alternativa aos métodos empíricos são os modelos que se baseiam nos processos físicos de transporte de massa e energia, os quais estão acoplados através de algum modelo de interação solo-planta-atmosfera. Trata-se de uma abordagem mais determinística e utiliza os modelos Soil Vegetation Atmosphere Transfer (SVAT), que simulam a ET, entre outros processos, através da interação dos diferentes elementos do sistema. Muitos modelos empíricos foram desenvolvidos e/ou adaptados para a estimativa da ET. Dentre os mais recentes, o modelo Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) vem sendo aplicado com relativo sucesso mesmo em superfícies heterogêneas, na tentativa de descrever a variação espacial de parâmetros micrometeorológicos com base em funções semi-empíricas.

Bastiaanssen (1995) desenvolveu o Surface Energy Balance Algorithm for Land - SEBAL originalmente na Espanha e no Egito usando imagens do satélite Landsat 5 TM. Logo adiante, Roerink et al. (1997) também aplicaram o mesmo sensor para monitorar o desempenho de irrigação na Argentina e no Paquistão em conjunto com o sensor AVHRR/NOAA.. Combinações do satélite Landsat 5TM e NOAA/AVHRR foram usadas também por Timmermans e Meijerink (1999) na África. Mais tarde, Hafeez & Chemin (2002) aplicaram o SEBAL usando o sensor ASTER instalado a bordo do satélite EOS/TERRA no rio de Pumpanga, Filipinas, concluindo que a combinação de alta-resolução espacial dos sensores ETM+ e ASTER com a alta resolução temporal dos sensores AVHRR e MODIS forneceram uma alta precisão nos estudos de balanços hídricos e usos da água, em escalas regionais.

O modelo SEBAL baseia-se no balanço superficial de energia, o qual divide-se entre o fluxo de calor sensível, o fluxo de calor latente e o fluxo do calor do solo, e pode ser utilizado com imagens digitais coletadas por qualquer satélite orbital que registre a radiação nos comprimentos de onda do visível, infravermelho próximo e infravermelho termal. (Allen et. al, 2002).

Neste exame de qualificação, apenas dois sensores de alta resolução temporal (AVHRR/NOAA e MODIS/TERRA) e quatro sensores de alta resolução espacial (TM e ETM+/LANDSAT; ASTER/TERRA e CBERS2) serão caracterizados de forma mais detalhada, em função de suas potencialidades na interação com o modelo SEBAL.

2. Sensores de alta resolução temporal e baixa resolução espacial

2.1. AVHRR/NOAA

O sensor AVHRR (Radiômetro Avançado de Resolução muito Alta) é um radiômetro imageador de varredura, que detecta a energia nas faixas do visível e infravermelho do espectro eletromagnético. Este radiômetro possui seis canais espectrais que observam simultaneamente uma mesma área da superfície terrestre. Após serem processados, os dados obtidos pelo AVHRR possibilitam a realização de análise multiespectrais em estudos oceanográficos, hidrológicos, do uso e cobertura da terra e de parâmetros meteorológicos.

O instrumento mede a energia solar refletida (visível e infravermelho próximo) nos canais 1, 2 e 3A. Esses dados provêm meios para o monitoramento da vegetação, cobertura de nuvens, lagos, litorais, neve, aerossóis e gelo. Os dados dos canais 3B, 4 e 5 são utilizados para detectar a energia termal emitida pela superfície (continentes e oceanos) e pela atmosfera.

Entretanto, somente cinco canais podem ser transmitidos para a Terra simultaneamente. Nos satélites de órbitas vespertinas, os canais 3A e 3B são alternados para operação de dia e de noite, respectivamente. Nas missões matutinas, o canal 3B fica permanentemente ativo.

Cada canal do instrumento possui um campo de visada instantânea IFOV (Instantaneous Field-of-View) médio de 1,3 miliradianos, proporcionando, assim, uma resolução espacial de 1,1 km no nadir. Um espelho elíptico de varredura em constante rotação possibilita a realização de varreduras transversais entre $\pm 55,4^\circ$ a partir do nadir.

A varredura transversal (da direita para a esquerda) é executada por incrementos de IFOV, a uma taxa de 360 linhas por minuto. Os dados análogos do sensor são digitalizados a bordo do satélite, com resolução de 10 bits (0 a 1023 níveis digitais), a uma taxa de 39936 amostras por segundo, por canal. Nesta razão de amostragem, são, são obtidas 1362 amostra por IFOV. Dessa forma, um total de 2048 amostras são obtidas por canal, a cada linha. A faixa imageada obtida tem cerca de 2250 km de largura.

O AVHRR apresenta avanços quando comparados com versões anteriores, tais como aperfeiçoamento espectral e de ganho nos canais do visível, que permitem uma melhor detecção de baixos níveis de luminosidade. Além disso, teve adicionado um sexto canal, denominado 3 A, centrado em 1,6 μm , de modo a permitir uma melhor discriminação de nuvens e gelo.

Um escudo externo contra o sol e um disco interno foram adicionados ao AVHRR para reduzir os efeitos causados pela luz solar sobre a cavidade óptica do instrumento e seus respectivos detectores. A Tabela 01 apresenta os canais do AVHRR e suas respectivas características espectrais, espaciais e termais (quando apropriado). Os canais na faixa do visível e infravermelho próximo utilizam detectores tipo fotodiodo quadrados (0,254 cm de lado) de silício, para medir a radiação incidente. Análises realizadas indicam que 99 % dos raios incidentes são coletados pelo sensor.

Tabela 01: Características dos canais do instrumento AVHRR

Canal	Banda Espectral (μm)	Resolução Espacial (km)	Relação S/N ou NEAT¹
1 - visível	0,58 – 0,68	1,1	$\geq 9:1$ a 0,5 % albedo
2 - IV próximo	0,725 – 1,00	1,1	$\geq 9:1$ a 0,5 % albedo
3 A - IV próximo	1,58 – 1,64	1,1	$\geq 20:1$ a 0,5 % albedo
3 B - infravermelho	3,55 – 3,93	1,1	$\leq 0,12$ K a 300 K
4 - infravermelho	10,3 – 11,3	1,1	$\leq 0,12$ K a 300 K
5 - infravermelho	11,5 – 12,5	1,1	$\leq 0,12$ K a 300 K

¹ Relação Sinal/Ruído ou Noise equivalent differential temperature.

Os canais do infravermelho utilizam detectores resfriados a 105 K (-168,15 °C). O detector selecionado par o canal 3B é o fotodiodo de InSb (antimoneto de índio)

enquanto o canal 3 A utiliza o InGaAs. Os canais 4 e 5 utilizam o fotocondutor de HgCdTe (relureto de cádmio mercúrio).

Os canais de infravermelho são calibrados em órbita. A casa varredura, o instrumento visa o espaço (radiância zero) e um alvo interno (290 K ou 16,85 °C, aproximadamente) a bordo do satélite. Esse alvo interno foi projetado para se comportar como um corpo negro. Os canais no visível não são calibrados em órbita (ainda que a visada do espaço seja disponível como ponto de referência).

A primeira vez, os canais 1, 2 e 3 A do AVHRR incorporaram um ganho dual para baixos níveis de luminosidade. Essa nova característica proporciona uma melhor resolução na detecção das radiâncias. A metade da amplitude dinâmica dos canais 1 e 2 está ajustada para detecção de valores de albedo entre 0 e 25%. Já o canal 3 A, apresenta um ajuste semelhante, voltado para a detecção de variações do albedo entre 0 e 12,5 %. Os instrumentos AVHRR anteriores utilizavam uma equação de calibração linear para cada canal no visível. Atualmente, duas equações são necessárias por cada canal. A agência NOAA monitora as inclinações duais de calibração para assegurar que a linearidade da eletrônica e os pontos de inflexão não sejam alteradas com o passar do tempo.

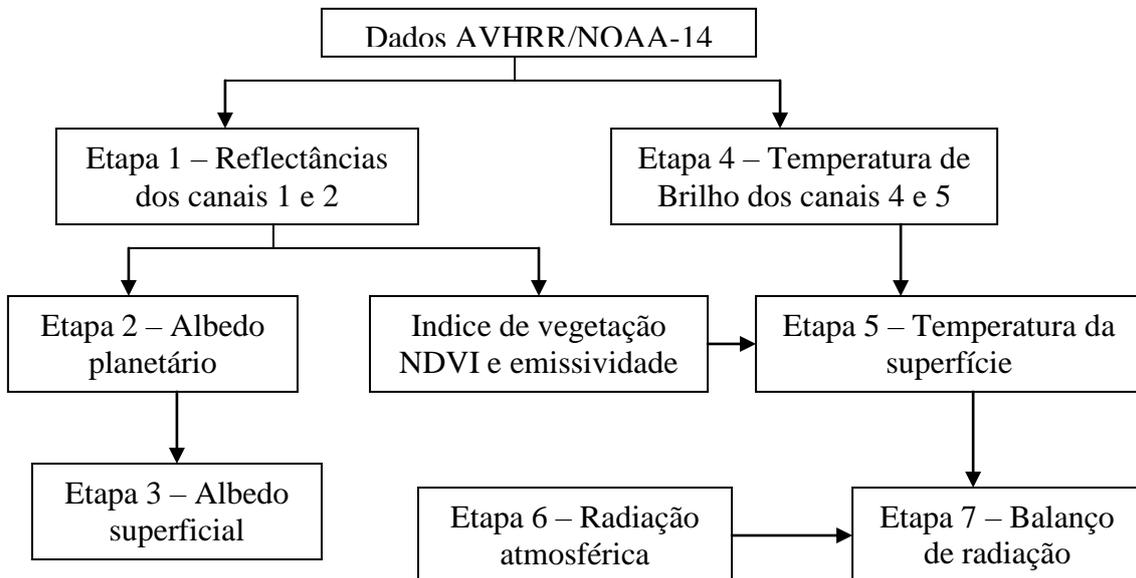
O modo normal de operação dos satélites NOAA requer a transmissão direta dos dados AVHRR para Terra continuamente, em tempo real. Essa transmissão direta em tempo real é denominada HRPT (High Resolution Picture Transmission) para os dados com alta resolução de 1,1 km, ou APT, com resolução reduzida por 4 km. O modo APT utiliza apenas dois dos seis canais do AVHRR, selecionados por comando de Terra. Esse modo produz uma linha de varredura geometricamente mais linear, porém com resolução espacial reduzida.

Os dados AVHRR também podem ser gravados a bordo da espaçonave com posterior retransmissão para estações em Terra. Esses dados podem ser registrados em alta resolução (1,1 km), no mesmo formato HRPT, ou com resolução de 4 km. As imagens armazenadas em alta resolução são denominadas LAC (Local Area coverage). Devido à enorme quantidade de bits, somente cerca de dez minutos de dados LAC podem ser acomodados num único registro. Por outro lado, 116 minutos de imagens de menor resolução (4 km), denominadas GAC, podem ser armazenadas a bordo, de forma que é possível cobrir completamente os 102 minutos de uma órbita completa.

2.1.1. Utilização do sensor AVHRR no modelo SEBAL

Através do SEBAL podemos estimar R_n com base nas reflectâncias dos canais 1 e 2, nas temperaturas de brilho dos canais 4 e 5 do AVHRR, e algumas informações coletadas em dois pontos à superfície. Isso permite efetivar a correção atmosférica no cálculo do albedo superficial e a radiação de ondas longas emitida pela atmosfera, como será visto adiante.

No Quadro 01, estão apresentados os principais procedimentos utilizados no cálculo de R_n que envolvem diferentes algoritmos baseados nas medições das bandas 1, 2, 4 e 5, do AVHRR/NOAA-14, e alguns dados de superfície.



Quadro 01: Fluxograma com as principais etapas de cálculo do Balanço de Radiação

O Processamento de arquivos AVHRR/NOAA, disponíveis na internet e em instituições nacionais e pesquisas, ensino ou operacionais, é uma tarefa que requer um conhecimento computacional mais apurado, uma vez que os arquivos, em sua forma original (dados brutos), são apresentados no formato denominado Level 1b. Ademais, o usuário precisa estar mais familiarizado com parâmetros orbitais e conhecer a disposição e tipo de informação contida nos arquivos em formato HRPT, SHARP-1 e LEVEL 1-B. Esses arquivos se encontram em formato binário e contém vários tipos de informações, tais como: o dia em que foi obtida a imagem, a hora de início da varredura da imagem, as coordenadas de posição de alguns pixels da área imageada, etc. Além

disso, são necessárias rotinas computacionais que possibilitem a separação das bandas espectrais contidas no arquivo, outras para efetivar a calibração radiométrica e outras para visualização das imagens. Atualmente há no mercado, diversos softwares que auxiliam nessas rotinas, separando todos os canais, fazendo a correção geométrica e a calibração radiométrica, dentre outras.

2.2. O Sensor MODIS

Em 1991 foi elaborado um projeto de longa duração pela National Aeronautics and Space Administration (NASA), denominado Sistema de Observação da Terra (EOS-Earth Observing System) com suporte do governo dos Estados Unidos. Um dos principais interesses deste projeto é o estudo das relações entre as formações vegetais terrestres e os processos globais de larga escala, com o objetivo de entender o funcionamento da Terra como um sistema único e integrado. Isso requer o conhecimento da distribuição global dos tipos de vegetação assim como suas propriedades biofísicas e estruturais, e suas variações espaciais e temporais (Huete et al., 2002).

O satélite Terra foi lançado em dezembro de 1999, começando a coletar dados em fevereiro de 2000, com o horário de passagem as 10:30 hs da manhã no equador. Dentre os sensores que este satélite transporta, o principal deles, o sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), foi projetado para atender os requerimentos de três campos de estudos diferentes: terra, oceano e atmosfera. Este sensor apresenta 36 bandas de resolução espectral e espacial selecionadas para o conhecimento de diferentes necessidades observacionais e para oferecer uma cobertura global quase diariamente (Justice, 2002). As especificações técnicas deste sensor estão dispostas na Tabela 02:

Tabela 02 - Especificações Técnicas do Satélite Terra/Sensor Modis.

Órbita do satélite Terra	705 Km, síncrona com o Sol, polar; 10:30 a.m descendente
Cobertura de repetição do satélite Terra	Diária, a norte da latitude 30° e a cada dois dias, para latitudes inferiores a 30°
Cobertura dos imageamentos	± 55°; 2330 km ("scans" contínuos no nadir no equador)
Resolução espacial	250 m (2 bandas), 500 m (5 bandas), 1000 m (29 bandas) no nadir
Precisão radiométrica	5% Absoluto, <3 µm; 1% Absoluto, >3 µm; 2% de reflectância
Alcance espectral	0,4 –14,4 µm
Quantização	12 bits
Taxa de Dados do satélite Terra	6,2 Mbps (média), 10,8 Mbps (dia), 2,5 Mbps (noite)
Força do satélite Terra	162,5 W (média para uma órbita), 168,5 W (pico)

Fonte: Adaptada de Barker et al. (1992, p. 3-4) e Justice et al. (2002a, p.4).

O As 36 bandas espectrais deste sensor estão localizadas em função de um comprimento de onda, cuidadosamente escolhidos para a observação de feições das propriedades das nuvens, dinâmica e as propriedades da vegetação na cobertura terrestre, e a temperatura da superfície dos oceanos no mundo (Salomonson e Toll, 1990). Estas especificações têm como objetivo evitar as bandas de absorção atmosférica, além de outras feições, durante a observação e monitoramento da superfície terrestre (Salomonson e Barker, 1992).

As primeiras 19 bandas estão posicionadas na região do espectro eletromagnético situado entre 405 nm a 2155 nm, de forma que as bandas 1 a 7 estão direcionadas para as aplicações terrestres; as bandas 8 a 16 para as observações oceânicas e as bandas 17 a 19 para as medições atmosféricas. As bandas 20 a 36, com exceção da banda 26 (1360-1390 nm) cobrem a porção termal do espectro eletromagnético.

A Tabela 03 apresenta uma comparação entre os comprimentos de onda dos principais sensores utilizados nos estudos de monitoramento da superfície da Terra, dentre eles, o modelo SEBAL

Faixa Espectral	NOAA/ AVHRR	Landsat ETM+		MODIS
Azul		0.450 - 0.515		0.459 - 0.479
Verde	0.550 - 0.680	0.525 - 0.605	0.520 - 0.900	0.545 - 0.565
Vermelho		0.630 - 0.690		0.620 - 0.670
Infravermelho Proximo		0.775 - 0.900		0.841 - 0.876
Infravermelho Medio				1.230 - 1.250
Infravermelho Medio		1.550 - 1.750		1.628 - 1.652
Infravermelho Medio		2.090 - 2.350		2.105 - 2.155
Resolucao Espacial		30, 15m		250, 500, 1000m
Resolucao Temporal	12 horas	16 dias		1 - 2 dias

Tabela 03: Comprimento de ondas dos principais sensores usados no SEBAL

As bandas do sensor Modis, desenvolvidas para o monitoramento da superfície terrestre, têm uma herança do Landsat Thematic Mapper e NOAA/AVHRR (Figura 01), com capacidades melhoradas tanto nos menores comprimentos de onda quanto no infravermelho (Justice et al., 1998).

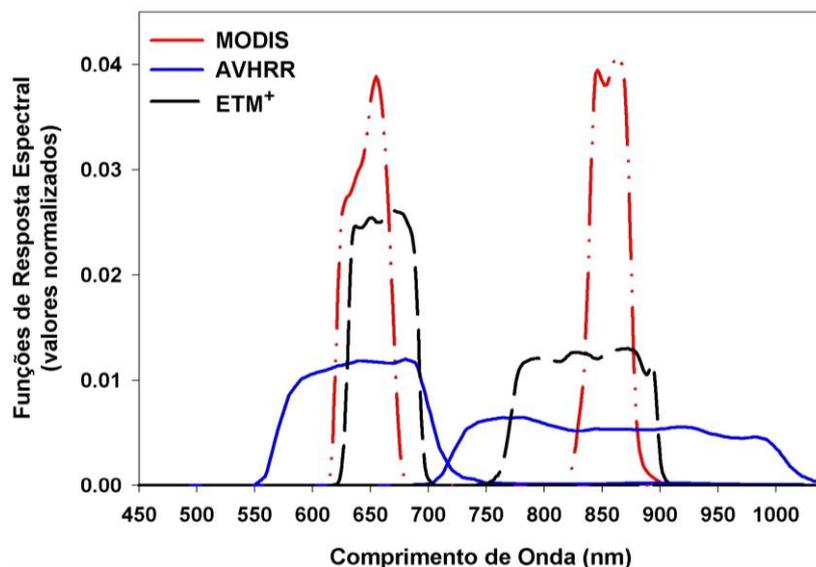


Figura 01 - Disposição e largura de bandas do sensor MODIS em relação aos sensores ETM+ e AVHRR. Fonte: Adaptada de Justice et al. (1998).

A faixa espectral de cada uma das bandas e suas aplicações para o monitoramento da superfície terrestre (bandas 1 a 7) podem ser observadas na Tabela 04. Pode-se afirmar que o sensor MODIS possui bandas espectrais finas, específicas para as necessidades da comunidade científica, que desenvolve pesquisas nas áreas continentais do planeta (Strahler et al., 1996).

Tabela 04 - Bandas Espectrais do Sensor Modis para o Estudo da Superfície Terrestre.

Uso preliminar	Bandas	Largura da banda
Terra/ Nuvens / Limites de aerossóis	1	620-670
	2	841-876
Terra/ Nuvens/ Propriedade de aerossóis	3	459-479
	4	545-565
	5	1230-1250
	6	1628-1652
	7	2105-2155

Fonte: Adaptada do website <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specs.html>

2.2.1. Em relação às resoluções espacial e temporal

As bandas do MODIS para o estudo da superfície terrestre possuem resolução espacial de 250 m (para os canais do vermelho e infravermelho próximo) e 500 m (para as bandas do azul, verde e infravermelho médio) que são os valores nominais para pixels no nadir. No limite da largura da área imageada, os pixels crescem com um fator de duas vezes na direção ao longo da linha de imageamento e de um fator de cinco vezes na direção através da linha de imageamento.

Na Tabela 05, mostra-se uma comparação entre as resoluções espaciais entre dois sensores novos, presentes no satélite Terra, e os que vem sendo utilizados para estudos de monitoramento da parte continental do planeta.

Tabela 05 - Comparação entre as resoluções espaciais dos sensores ASTER, ETM+, MODIS e AVHRR, utilizadas para o monitoramento terrestre.

BANDAS/ RESOLUÇÃO ESPACIAL (em metros)	ASTER	ETM+	MODIS	AVHRR
Azul	-	30	500	-
Verde	15	30	500	-
Vermelho	15	30	250	1100
IVP	15	30	250	1100
IVM	30	30	500	-
IVT	90	60	1000	1100

Fonte: Adaptada do website: www.earthobservatory.nasa.gov.(2003).

Em relação à resolução temporal do satélite TERRA, é apresentada abaixo uma comparação entre alguns sistemas sensores orbitais (Tabela 06).

Tabela 06 – Intervalos de revisita de alguns satélites de sensoriamento remoto.

Sistema/Sensor	Intervalo de Revisita (dias) (em dias)	Passagem no Equador (diurno)
Landsat/TM ; ETM+	16	09:45h e 10:00h
SPOT/HRV	26	10:30h
Terra/MODIS	2	10:30h
Terra/ASTER	16	10:30h

(^a) – direcionamento da visada para a lateral.

Nota-se que o sensor MODIS possui um intervalo quase diário para a revisita de uma área, o que lhe confere uma grande capacidade para estudos de dinâmicas ecológicas tanto terrestres, quanto oceânicas.

2.2.2. Em relação a geolocalização:

A geolocalização (georreferenciamento) do sensor MODIS foi estabelecida através do uso de uma técnica paramétrica, onde pontos de controle foram aplicados somente para remover as direções tendenciosas. Sua orientação em relação à Terra é obtida através de sensores a bordo do satélite. Sua distância da Terra é medida por um giro inercial e por um sensor “star-tracking”, onde a posição é medida por um TDRSS (“Tracking Data Relay Satellite System”) a bordo de um sistema de navegação (TONS) (Telles et al., 1995).

Os produtos de georreferenciamento do sensor MODIS definem as coordenadas geodésicas, elevação do solo (altitude), e ângulos zenitais solar e azimutal para cada amostra de 1 Km do MODIS. Esses dados são fornecidos como parte do banco de dados das radiâncias calibradas no nível 1B e os dados do nível 2, para permitir um processamento posterior, ou seja, estes dados serão, subseqüentemente usados para reamostrar espacialmente e compor temporariamente os produtos MODIS em grades georreferenciadas.

No momento do lançamento, o MODIS apresentava uma precisão de 1.700 metros, e com os ajustes iniciais, em maio de 2000, a precisão já era de 150 metros. Em dezembro de 2000, já havia atingido 50 metros, conforme planejado.

Em função da maior quantidade de bandas, e conseqüentemente mais estreitas elas forem individualmente, mais informações se terá sobre a distribuição da energia refletida pela cena estudada e melhor será a resolução espectral, isto é, a curva de resposta espectral de cada alvo. A configuração dessa curva denota as características espectrais do objeto, e exerce forte influência na escolha da região espectral na qual os dados de Sensoriamento Remoto deverão ser coletados, visando alguma aplicação particular.

Para o modelo SEBAL, Hafeez et al. (2002) utilizou as bandas 1, 2, 31 e 32 na estimativa da evapotranspiração da cultura do arroz, nas Filipinas, numa resolução espacial de 250 m, obtendo bons resultados, quando comparado com os sensores Aster e ETM+ (15 e 30 m). Os autores concluíram que o uso Modis combinado com sensores de maior resolução espacial (TM, ETM+ ou Aster) são bastantes promissores e que mais trabalhos, visando a sua operacionalização devem ser executados.

3. Sensores de alta resolução espacial e baixa resolução temporal

3.1. Sensores TM e ETM+ dos satélites LANDSAT

3.1.1 O Programa LANDSAT

O primeiro satélite de Sensoriamento Remoto de recursos terrestre não tripulado, foi o Earth Resources Technology Satellite 1 (ERTS-1), lançado no ano de 1972 pelos norte-americanos, O ERTS-1 foi construído a partir de uma modificação do satélite meteorológico NIMBUS e carregava a bordo dois tipos de sensores: um sistema de varredura multiespectral, o MSS (Multiespectral Scanner Subsystem) e um sistema de varredura constituído por três câmeras de televisão RBV (Return Beam Vidicon).

Após o lançamento do ERTS-1, o programa foi rebatizado para LANDSAT, e 6 outros satélites foram colocados em órbita da Terra, O sensor Multispectral Scanner (MSS) dos satélites LANDSAT 1 a 3 registraram, até 1983, mais de 1,3 milhões de imagens, Cada imagem cobre uma área de 185 km por 185 km, em 3 ou 4 bandas diferentes. No LANDSAT 3 foi instalado mais um canal na faixa do infravermelho-termal (TIR) que possuía uma resolução espacial de 240 m, no nadir. A configuração de órbita dos satélites LANDSAT 1, 2 e 3, foi estabelecida de tal modo que, a cada 18 dias eles passassem sobre uma mesma região da superfície terrestre. O ângulo de inclinação da órbita do satélite em relação ao plano do equador sendo de $99,1^\circ$, fazia com ele descrevesse uma órbita quase polar em torno da Terra, garantindo o imageamento entre as latitudes de 81° N e S.

Esta inclinação também garantia que a órbita fosse heliosíncrona, isto é, o satélite cruzava o equador em órbita descendente, no mesmo horário local, durante todo o ano, Para que isto ocorresse, o plano de órbita deslocava-se em torno da Terra à mesma velocidade do deslocamento da Terra em relação ao Sol. A altitude da órbita era de 917 km e sua duração de 103 min. O horário médio de passagem dos satélites da série LANDSAT 1 a 3 pelo equador era às 9:30 h, variando conforme a longitude.

O LANDSAT 4 foi lançado em Julho de 1982 e faz parte da segunda geração dos sistemas passivos de alta resolução. Em Fevereiro de 1983 o canal de transferência dos dados deixou de ser usado, Por isso, o satélite foi substituído pelo idêntico LANDSAT 5, que foi lançado em 1º de Março de 1984 e continua sendo operacional até hoje. Em Setembro de 1994, a NASA lançou o LANDSAT 6, mas o satélite caiu e nunca entrou em fase operacional, O LANDSAT 7 foi lançado em 1999, Os LANDSAT 4 e 5

são dotados com dois sistemas de “scanners”: o antigo MSS, para fazer comparações das imagens dos LANDSAT 1 a 3, e um “scanner” mais desenvolvido, o Thematic Mapper (TM).

Em comparação com o MSS, o TM é caracterizado por uma resolução espacial de 30 m e de 120 m no canal termal (no MSS, 80 e 240 m, respectivamente) e um intervalo menor entre seus canais. O LANDSAT 5 tem uma órbita quase polar e heliossíncrona, numa altitude média de 705,3 km e uma inclinação de 98,2°. Para percorrer uma órbita, o satélite leva 99 minutos, o que significa dizer que percorre, em um dia, 14,5 órbitas. Em 16 dias, o LANDSAT 5 cobre toda a Terra. A passagem pelo equador ocorre às 9:45 h (hora local). Suas imagens apresentam uma resolução radiométrica de 8 bits (256 níveis de cinza).

Em 1999 foi lançado o LANDSAT 7, um satélite que não só substituiu o LANDSAT 5 já no final de sua vida útil, mas que trouxe uma série de benefícios adicionais com a substituição do “scanner” TM pelo ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus). Algumas características importantes do LANDSAT 7 ETM+:

- Gravação da banda 6 (infravermelho termal) em duas bandas, com alto ganho e baixo ganho (resolução espacial de 60 m);
- Nova banda pancromática com 15 metros de resolução espacial, [0,52-0,90 μm], sincronizadas às bandas multiespectrais;
- Maior precisão radiométrica absoluta;
- Geometria de imageamento melhorada significativamente, permitindo um georeferenciamento aproximado apenas com os dados de efeméride, com precisão de ~ 100-200 m;

As demais características como cobertura total e orbitais são quase idênticas às do LANDSAT 5 (inclusive as faixas de comprimento de onda nos canais multiespectrais), permitindo a fácil integração de dados LANDSAT 7 com dados dos satélites anteriores.

Os sensores TM e ETM+, em função da sua alta resolução espacial (30 m) nas bandas do visível e do infravermelho próximo têm sido largamente utilizados nas aplicações do SEBAL, em vários países do mundo (Soer, 1980; Roerink, et al. 1997; Granger, et al. 1997; Allen et al, 2002; Bastiaanssen, et al 1995, 2000; Timmermans et al, 1999; Chen, et al; 2002; Hafeez et al, 2002; Tasumi, 2003) e também pretende ser na

Região Norte Fluminense, RJ, em função das qualidades e especificidades já listadas desses sensores, bem como da metodologia operacional, que se encontra consolidada.

A Tabela 07, ilustra as diferentes bandas espectrais associadas aos satélites LANDSAT 5 TM e o LANDSAT 7 ETM+.

Tabela 07: Descrição dos canais do Mapeador Temático – TM do Landsat 5 e ETM+ do Landsat 7, com intervalos de comprimento de onda e coeficientes de calibração (radiância mínima (a) e máxima (b))

Descrição dos canais	Landsat -5 TM Comprimento de onda (μm)	Coeficientes de calibração ($\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$)		Landsat -7 TM Comprimento de onda (μm)	Coeficientes de calibração ($\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$)	
		a	b		a	b
Banda 1 (azul)	0,45-0,52	-0,150	15,21	0,45-0,52	-0,62	29,75
Banda 2 (verde)	0,53-0,61	-0,280	29,68	0,53-0,61	-0,60	30,34
Banda 3 (vermelho)	0,62-0,69	-0,120	20,43	0,63-0,69	-0,45	23,55
Banda 4 (infra-vermelho próx.)	0,76-0,90	-0,150	20,62	0,78-0,90	-0,45	23,50
Banda 5 (infra-vermelho médio)	1,55-1,75	-0,037	2,720	1,55-1,75	-0,10	47,70
Banda 6 (infra vermelho termal)	10,40-12,50	0,1238	1,560	10,40-12,50	0,00	17,04
Banda 7 (infra-vermelho médio)	2,08-2,35	-0,015	1,440	2,09-2,35	-0,04	16,60
Banda 8 (canal pancromático)	-	-	-	0,52-0,90	-0,50	24,40
Resolução Espacial	30 m 120 m (termal)	-	-	30 m 60 m (termal) 15 m (pan)	-	-
Período de revisita	16 dias	-	-	16 dias	-	-
Largura da faixa imageada	185 km	-	-	185 km	-	-

3. O Sensor ASTER/TERRA

O sensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) é um instrumento de imageamento a bordo no satélite Terra que foi lançado em dezembro de 1999. O ASTER é um esforço cooperativo entre a NASA e o Ministério da Economia do Japão e foi projetado para adquirir dados de temperatura da superfície da terra, emissividade, reflectância, e dados de elevação de terreno.

Esse sensor opera por um tempo limitado em partes do dia e da noite, ao longo de uma órbita. A configuração completa (todas as bandas em estéreo plus) coleta dados numa média de 8 minutos por órbita. A configuração reduzida (bandas limitadas, ganhos diferentes, etc) pode ser implementada conforme solicitação de pesquisadores interessados.

Uma cena do ASTER cobre uma área de aproximadamente 60 km por 60 km e os dados são adquiridos simultaneamente em três resoluções. As imagens são georeferenciadas com dados da projeção WGS84 e projeção Universal Transversa de Mercator - UTM

O Aster é um sensor de resolução espacial mais alta do satélite EOS/TERRA e o único que não adquire dados continuamente. Os produtos de dados do Aster incluem:

- Radiação e reflexão específicas da superfície da Terra;
- Temperatura da superfície e emissividade;
- Mapas digitais de elevação de imagens estéreo;
- Mapas de vegetação e da composição da superfície;
- Conseqüência das nuvens, gelo do mar e gelo polar; e
- Observação de desastres naturais (vulcões, etc.)

Uma cena completa do ASTER consiste em 14 bandas espectrais, com um faixa adicional, para criar um efeito de paralax. As três faixas do visível e infravermelho próximo (VNIR) têm uma resolução espacial de 15m e uma banda extra com a função de criar uma visão estereoscópica da Terra e desenvolver informações sobre elevação de

terreno. As seis faixas na onda curtas (SWIR) tenham uma resolução de 30 m. Finalmente há cinco faixas térmicas (TIR) com uma resolução de 90m. A Tabela 08 apresenta informações sobre os comprimentos de onda específicos do sensor ASTER.

Tabela 08: Características radiométricas e espaciais do sensor ASTER

Descrição dos canais	Banda	Comprimento de ondas (μm)	Resolução (m)
VNIR_banda1	1	0.52 – 0.60	15
VNIR_banda2	2	0.63 – 0.69	15
VNIR_banda3N	3	0.76 – 0.86*	15
VNIR_banda3B	4	0.76 – 0.86**	15
SWIR_banda4	5	1.60 – 1.70	30
SWIR_banda5	6	2.145 – 2.185	30
SWIR_banda6	7	2.185 – 2.225	30
SWIR_banda7	8	2.235 – 2.285	30
SWIR_banda8	9	2.295 – 2.365	30
SWIR_banda9	10	2.36 – 2.43	30
TIR_banda10	11	8.125 – 8.475	90
TIR_banda11	12	8.475 – 8.825	90
TIR_banda12	13	8.925 – 9.275	90
TIR_banda13	14	10.25 – 10.95	90
TIR_banda14	15	10.95 – 11.65	90

* visada no NADIR

** scanner invertido (tipicamente não usado)

Hafeez et al. (2002) aplicaram o modelo SEBAL utilizando o sensor Aster-TERRA para estimar a evapotranspiração em escala regional em Luzon Central, Filipinas, obtendo excelentes resultados, melhores que os obtidos com o sensor TM-Landsat. Para aplicação do modelo SEBAL, os autores utilizaram as bandas espectrais apresentadas na Tabela 09:

Tabela 09: Bandas espectrais do sensor ASTER, utilizadas no modelo SEBAL

Sensor	Banda	Banda No	Faixa espectral (μm)	Resolução espacial (m)
Aster	Vermelho	2	0.63-0.69	15
	Infravermelho próximo	3	0.76-0.86	15
	Infravermelho Termal	13	8.925-9.275	90
	Infravermelho Termal	14	10.25-10.95	90

O interesse por esse sensor orbital está diretamente relacionado a sua resolução espacial (15 m), aos seus comprimentos de onda mais “finos” e a sua resolução temporal (16 dias) semelhante as dos satélites da série Landsat.

O sensor ASTER proverá a próxima geração na capacidade de imageamento no sensoriamento remoto comparadas com o mais velho Landsat Tematic Mapper e o JERS-1 OPS.

4. CBERS 2

O satélite CBERS2, bem como o CBERS1, são umas das maiores conquistas da engenharia espacial brasileira e faz parte de um programa de satélites em parceria com a China tendo sido lançado com sucesso no dia 21 de outubro de 2003, partindo do Centro de Lançamento de Taiyuan, na China. O horário do lançamento foi às 11:16h (horário de Pequim), o que corresponde a 1:16h em Brasília.

Suas imagens são usadas desde o controle do desmatamento e queimadas na Amazônia Legal, até o monitoramento de recursos hídricos, áreas agrícolas, crescimento urbano e ocupação do solo, além de ser fundamental para grandes projetos nacionais estratégicos, como o SIVAM, e a ocupação de espaço definitivo em diversos programas ambientais.

O satélite CBERS possui um conjunto de sensores ou instrumentos – WFI (Câmera de Amplo Campo de Visada), CCD (Câmera Imageadora de Alta Resolução), IRMSS (Imageador por Varredura de Média Resolução) com alto potencial de atender a múltiplos requisitos de aplicações. Porém, cada um desses sensores tem características próprias que os tornam mais adequados a certas categorias de aplicações.

O potencial de aplicação de um dado sensor é estabelecido em função de suas características de resolução espacial, resolução temporal, e características espectrais e radiométricas. A fim de maximizar os resultados para melhor relação custo/benefício deve-se considerar o compromisso entre as necessidades da aplicação e as características dos sensores. A seguir são indicadas algumas aplicações para cada câmera, entretanto o universo de aplicações é muito mais amplo.

4.1. A Câmera Imageadora de Alta Resolução (CCD)

Por possuir uma boa resolução espacial (20 m) em quatro bandas espectrais, mais uma pancromática, presta-se à observação de fenômenos ou objetos cujo detalhamento seja importante. Por possuir um campo de visada de 120 km, auxilia nos estudos municipais ou regionais. Dada a sua frequência temporal de 26 dias, pode servir de suporte na análise de fenômenos que tenham duração compatível com esta resolução temporal. Essa resolução temporal pode ser melhorada, pois a CCD tem capacidade de visada lateral. Suas bandas estão situadas na faixa espectral do visível e do infravermelho próximo, o que permite bons contrastes entre vegetação e outros tipos de objetos.

- **Vegetação:** identificação de áreas de florestas, alterações florestais em parques, reservas, florestas nativas ou implantadas, quantificações de áreas, sinais de queimadas recentes.
- **Agricultura:** identificação de campos agrícolas, quantificação de áreas, monitoramento do desenvolvimento e da expansão agrícola, quantificação de pivôs centrais, auxílio em previsão de safras, fiscalizações diversas.
- **Meio ambiente:** identificação de anomalias antrópicas ao longo de cursos d'água, reservatórios, florestas, cercanias urbanas, estradas; análise de eventos episódicos naturais compatíveis com a resolução da Câmera, mapeamento de uso do solo, expansões urbanas.
- **Água:** identificação de limites continente-água, estudos e gerenciamento costeiro, monitoramento de reservatórios.
- **Cartografia:** dada a sua característica de permitir visadas laterais de até 32° a leste e a oeste, em pequenos passos, possibilita a obtenção de pares estereoscópicos e a conseqüente análise cartográfica. Essa característica também

permite a obtenção de imagens de uma certa área no terreno em intervalos mais curtos, o que é útil para efeitos de monitoramento de fenômenos dinâmicos.

- **Geologia e solos:** apoio a levantamentos de solos e geológicos.
- **Educação:** geração de material de apoio a atividades educacionais em geografia, meio ambiente, e outras disciplinas.

A Câmera CCD opera em 5 faixas espectrais incluindo uma faixa pancromática de 0,51 a 0,73 μm . As duas faixas espectrais do WFI são também empregadas na câmera CCD para permitir a combinação dos dados obtidos pelas duas câmeras. São necessários 26 dias para uma cobertura completa da Terra.

Características da Câmera Imageadora de Alta Resolução CCD		
	0,51-0,73 μm	(pan)
	0,45-0,52 μm	(azul)
Bandas espectrais	0,52-0,59 μm	(verde)
	0,63-0,69 μm	(vermelho)
	0,77-0,89 μm (infravermelho próximo)	
	8,3°	
Campo de Visada	20 x 20 m	
Resolução espacial	113 km	
Largura da faixa imageada	$\pm 32^\circ$	
Capacidade de apontamento do espelho	26 dias com visada vertical (3 dias com visada lateral)	
Resolução temporal	8103 MHz e 8321 MHz	
Frequência da portadora de RF	2 x 53 Mbit/s	
Taxa de dados da imagem	43 dBm	
Potência Efetiva Isotrópica Irradiada		

4.2. IRMSS (Imageador por Varredura de Média Resolução) tem duas bandas espectrais na região do infravermelho médio e uma pancromática, com 80 metros de resolução espacial, mais uma banda na região do infravermelho termal com 160 metros. Suas aplicações são as mesmas da CCD, com as devidas adaptações. Outras aplicações são:

- Análise de fenômenos que apresentem alterações de temperatura da superfície.
- Geração de mosaicos estaduais.
- Geração de cartas-imagens.

A câmera de varredura IRMSS tem 4 faixas espectrais e estende o espectro de observação do CBERS até o infravermelho termal. O IRMSS produz imagens de uma faixa de 120 km de largura com uma resolução de 80 m (160 m no canal termal). Em 26 dias obtém-se uma cobertura completa da Terra que pode ser correlacionada com aquela obtida através da câmera CCD.

Características do Imageador por Varredura de Média Resolução IRMSS	
Bandas espectrais	0,50-1,10 μ m (pancromática)
	1,55-1,75 μ m (infravermelho médio)
	2,08 - 2,35 μ m (infravermelho médio)
	10,40 - 12,50 μ m (infravermelho termal)
Campo de Visada	8,8°
Resolução espacial	80 x 80 m (160 x 160 m termal)
Largura da faixa imageada	120 km
Resolução temporal	26 dias
Frequência da portadora de RF	8216,84 MHz
Taxa de dados da imagem	6,13 Mbit/s
Potência Efetiva Isotrópica Irradiada	39,2 dBm

4.3. O WFI (Imageador de Amplo Campo de Visada)

Pode imagear grandes extensões territoriais, de mais de 900 km. Essa característica a torna muito interessante para observar fenômenos cuja magnitude ou interesse seja nas escalas macro-regionais ou estaduais. Em função dessa ampla cobertura espacial, sua resolução temporal também tem um ganho - podem ser geradas imagens de uma dada região com menos de cinco dias de intervalo. Entre as aplicações, podem ser mencionadas:

- Geração de mosaicos nacionais ou estaduais.
- Geração de índices de vegetação para fins de monitoramento.
- Monitoramento de fenômenos dinâmicos, como safras agrícolas, queimadas persistentes.
- Sistema de alerta, em que a imagem WFI serve como indicativo para a aquisição de imagens de mais alta resolução da CCD ou do IRMSS.
- Acoplamento a outros sistemas mundiais de coleta de dados de baixa a média resolução

O WFI produz imagens de uma faixa de 890 km de largura, permitindo a obtenção de carta-imagens com resolução espacial de 260 m. No período aproximado de cinco dias, obtém-se uma cobertura completa do globo.

Características do Imageador de Amplo Campo de Visada WFI	
Bandas espectrais	0,63-0,69 μm (vermelho) 0,77- 0,89 μm (infra-vermelho)
Campo de Visada	60°
Resolução espacial	260 x 260 m
Largura da faixa imageada	890 km
Resolução temporal	5 dias
Frequência da portadora de RF	8203,35 MHz
Taxa de dados da imagem	1,1 Mbit/s
Potência Efetiva Isotrópica Irradiada	31,8 dBm

A estratégia de distribuição das imagens do CBERS gratuitamente pela Internet tem provado o acerto de sua escolha. No período de 60 dias, com o site aberto em caráter experimental, houve mais de 6,8 mil cenas distribuídas, com mais de 2 mil pedidos, cobrindo mais de 350 instituições e cerca de 500 usuários. Apenas a título de comparação sobre o significado desses dados, o INPE comercializa cerca de 1 mil a 1,5 mil imagens do satélite americano Landsat a cada ano. Apesar dessa imensa demanda, o INPE tem conseguido um nível de atendimento de 99,2% dos pedidos. Um dos pontos altos do sistema de relacionamento do usuário com o banco de imagens do CBERS, que está disponível na página <http://www.obt.inpe.br/catalogo>, é a facilidade de consulta e a rapidez e excelência do atendimento.

Os usuários que têm acessado o sistema de busca englobam um amplo leque de perfis. São universidades públicas e privadas; secretarias, como as de Meio Ambiente, Fazenda, Agricultura, Educação, Justiça; órgãos públicos, como Embrapa, CPRM, ANA, IBAMA, ANEEL, IPT; organizações não-governamentais diversas; prefeituras; órgãos estaduais, como IPT, Instituto Florestal; escolas públicas estaduais; empresas de consultoria; jornais; setor hoteleiro; empresas públicas de saneamento e energia, como CEMIG, SABESP, SANEPAR; empresas de geologia, petróleo, agricultura, como Petrobrás, Codelco, Copersucar; empresas de engenharia, aerolevanteamento, topografia, propaganda e marketing; cidadãos particulares, estudantes, etc.

Prevê-se que o número de imagens solicitadas possa chegar a mais de 15 mil até o final do ano de 2005. Espera-se que com o acesso facilitado ao dado básico de sensoriamento remoto, que são as imagens, haverá o surgimento novos empreendedores e novas oportunidades no setor de aplicações espaciais.

As imagens CBERS 2 podem ser utilizadas para o processamento do SEBAL, porém as bandas do Imageador por Varredura de Média Resolução – IRMSS necessitam de calibração, cujos valores ainda estão disponíveis à comunidade científica, porém trabalhos que utilizem a Câmera Imageadora de Alta Resolução – CCD já podem ser desenvolvidos normalmente, devido a disponibilização dos coeficientes de calibração. Esses coeficientes, estabelecidos pelo Dr. Flávio Ponzoni (2004), Pesquisador do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, serão apresentados a seguir:

4.4. CALIBRAÇÃO ABSOLUTA DA CÂMERA CCD/CBERS-2

Orientação aos usuários

4.4.1. Considerações gerais

A calibração absoluta de um sensor tem como objetivo relacionar o número digital (ND) existentes nas imagens por ele gerada com valores de radiância (L_λ), permitindo assim aos usuários a transformação dos NDs presentes nessas imagens em valores físicos como a própria L_λ ou como em valores de reflectância (ρ_λ).

Os procedimentos que serão apresentados a seguir visam instruir a comunidade usuária de dados da câmera CCD, colocada a bordo do satélite CBERS-2, sobre como proceder para viabilizar as transformações em questão.

Vale salientar que todo o procedimento descrito fundamenta-se na calibração de imagens CCD/CBERS-2 nível L1 (nível padrão de distribuição das imagens adotado pelo INPE).

4.4.2. Dos coeficientes de calibração

Foram determinados coeficientes de calibração mediante o procedimento apresentado no fluxograma da Figura 1.

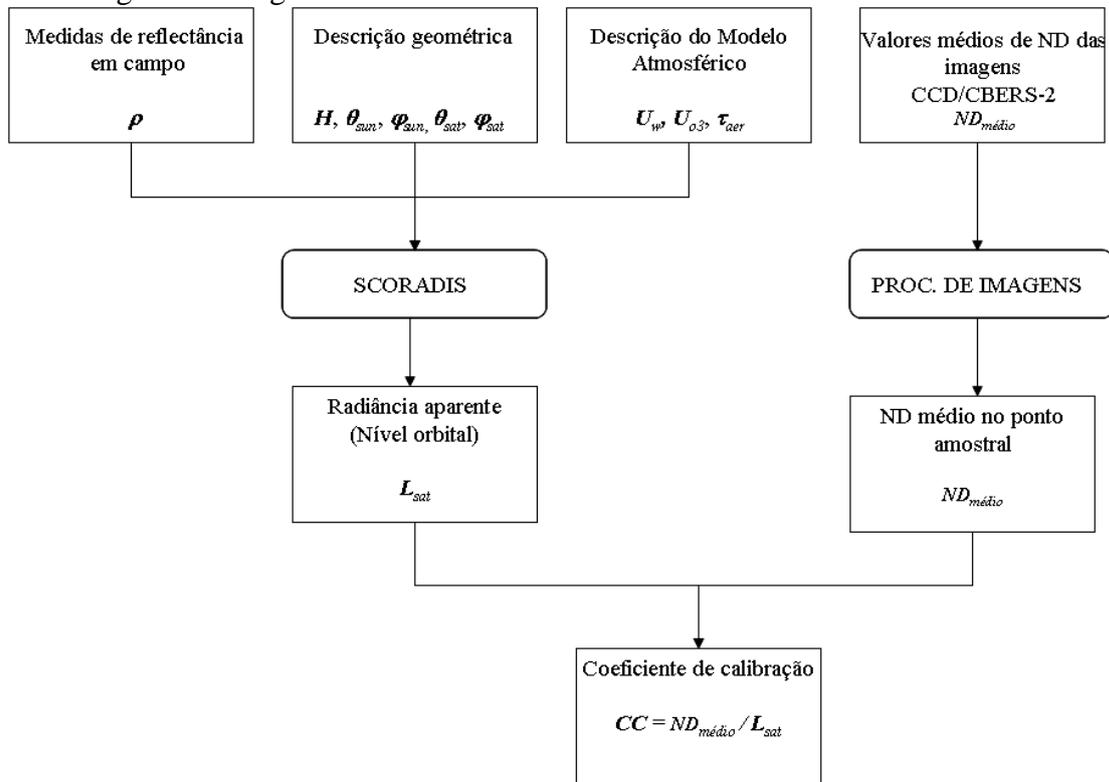


Figura 2 – Fluxograma referente aos procedimentos que originaram os coeficientes de calibração da câmera CCD/CBERS-2.

Medidas de reflectância em campo (ρ): essa etapa incluiu a seleção de sítios de calibração localizados em território nacional que atendessem alguns critérios básicos que conferissem aos resultados um máximo de confiabilidade. Esses critérios relacionaram-se à altitude média das superfícies de referência (preferencialmente acima dos 1000m), regiões com baixos índices de nebulosidade no horário de passagem do satélite, uniformidade espectral (caracterizada pelos Coeficientes de Variação de valores de ρ determinados em campo) e pela isotropia espectral (caracterizada pela dinâmica dos valores de ρ ao longo de específicos intervalos de tempo);

Descrição geométrica: aqui são levados em consideração dados referentes a altitude efetiva da superfície de referência, bem como demais dados que caracterizam as geometrias de iluminação (θ_{sun} e φ_{sun}) de visada (θ_{sat} e φ_{sat}) no horário de passagem do satélite sobre a superfície de referência;

Descrição do modelo atmosférico: trata-se de uma das etapas mais importantes de todo o procedimento, pois quanto mais confiável for a caracterização dos parâmetros atmosféricos, mais confiável também será o valor de L_λ estimada no topo da atmosfera (L_{sat}) que originará os coeficientes de calibração. A caracterização em questão

fundamentação no cálculo da Profundidade óptica (τ_{aer}), Concentração de Ozônio (U_{O^3}) e Concentração de Vapor D'água (U_w);

Valores médios de ND das imagens CCD/CBERS-2: conforme já mencionado anteriormente, todo o procedimento de calibração descrito aqui se fundamentou em imagens CCD/CBERS-2 nível L1. Assim, valores de ND médios foram determinados para cada banda espectral, os quais foram determinados mediante a localização dos pixels referentes aos pontos das medições radiométricas realizadas em campo, concomitantemente à passagem do satélite. Esses valores médios foram determinados mediante a média aritmética dos NDs dos 5 pixels em torno do pixel central referente à coordenada do ponto de calibração (incluindo o próprio ND do pixel central);

SCORADIS: trata-se de um aplicativo desenvolvido pelo Centro de Estudos Meteorológicos e Climáticos Aplicados à Agricultura da Universidade Estadual de Campinas (CEPAGRI/UNICAMP) que tem como objetivo aplicar o modelo 5S de correção atmosférica. Nesse caso, o modelo foi invertido para estimar a interferência atmosférica sobre os valores de ρ determinados em campo, permitindo assim determinar os valores de L_{sat} ;

Coeficientes de calibração: o cálculo dos Coeficientes de Calibração (CC_n , $n=1,2,3,4,pan$) é viabilizado mediante a relação entre os NDs médios e os respectivos valores de L_{sat} .

Os coeficientes de calibração apresentados na Tabela 10 foram determinados mediante a realização de duas campanhas de calibração, sendo uma realizada em junho e outra em agosto de 2004 em superfícies de calibração eleitas em fazendas localizadas na região de Luiz Eduardo Magalhães, oeste do Estado da Bahia.

Tabela 10: Coeficientes de calibração absoluta da câmera CCD/CBERS-2 (CC_n)

<i>CCD-1</i>	<i>CCD-2</i>	<i>CCD-3</i>	<i>CCD-4</i>	<i>CCD-Pan</i>
1,009	1,930	1,154	2,127	1,483

4.2.3. Conversões de interesse

O cálculo de L_λ (aparente) se dá mediante a aplicação da seguinte equação:

$$L_\lambda = ND_n / CC_n \quad (\text{Eq.03})$$

Onde: L_λ = radiância espectral aparente;

ND_n = número digital extraído da imagem na banda n ($n=1,2,3,4,pan$);

CC_n = coeficiente de calibração absoluta para a banda n ($n=1,2,3,4,pan$).

O resultado é expresso então em $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$

Para a transformação dos valores de L_λ em valores de reflectância aparente (ρ_{apa}) basta aplicar a seguinte equação:

$$\rho_{apa} = (3,1423 * (ND_n / CC_n) * D^{**2}) / (esunn * \cos(\text{zen})); \quad (\text{Eq. 04})$$

Onde: D= distância Terra-Sol em unidades astronômicas (assume valores 0,983 em janeiro e 1,0167 em julho);

esunn= valores de Irradiância solar no topo da atmosfera na banda n (n=1,2,3,4,pan), apresentados na Tabela 11;

cos(zen)= cosseno do ângulo zenital solar no momento de aquisição da imagem.

Tabela 11 – Valores de esunn no topo da atmosfera ($\text{W.m}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}$)

esun1	esun2	esun3	esun4	esunpan
1934,03	1787,10	1548,97	1069,21	1664,33

É importante salientar que ρ_{apa} contém toda a interferência atmosférica, não servindo, portanto para caracterizar espectralmente um objeto mediante sua avaliação. Para viabilizar tal caracterização, faz-se necessário a determinação de valores de Reflectância de Superfície (ρ_{sup}) mediante a aplicação de algum modelo de correção atmosférica, seja ele fundamentado na transferência radiativa ou não.

Os coeficientes de calibração apresentados estão sob constante avaliação e o autor solicita que qualquer inconsistência ou dúvida sejam dirigidas a ele pelo email flavio@ltid.inpe.br.

Referências bibliográficas:

Anderson, L.O., Latorre, M.L.; Shimabukuro, Y. E.; Arai E.; Júnior, O. A. C. **Sensor Modis, Uma Abordagem Geral**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. São José dos Campos, SP. 54 p. 2003.

Allen, R.G.; Tasumi, M.; Trezza, R.; Bastiaanssen, W.G.M.. **SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land), Advanced Training and Users Manual. Version 1.0**. University of Idaho. EUA; 97 p. 2002.

Barker, J.L.; Harden, M.K.; Anuta, E.A.; Smid, J. e Hougt, D. **MODIS spectral sensitivity study: requirements and characterization**. Washington: Nasa, Oct, 84 p. 1992.

Bastiaanssen, W. G. M. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. Ph.D. Thesis. Wageningen Agricultural University. Wageningen, Netherlands, 237 p. 1995.

Bastiaanssen, W. G. M.; Menenti, M.; Feddes, R. A.; Holtslag, A. A. M. A Remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): formulation. *Journal of Hydrology*, 212-213: 198-212, 1998

Courault, D.; Clastre, P.; Cauchi, P.; Delécole, R. analysis of spatial variability of air temperature at regional scale using remote sensing data and a SVAT model. In: First International Conference Geospatial Information in Agriculture and Forestry. 1998, Lake Buena Vista, Florida, EUA. Proceedings. Lake Buena Vista: ERIM, 1998. p. 149-156.

Folhes M. T. Estimativa do uso consuntivo da água em escala regional na agricultura irrigada . Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Proposta de tese de doutorado em sensoriamento remoto. INPE, São José dos Campos, SP. 88 p. 2004.

Hafeez, M.M.; Chemin, Y.; Van De Giesen, N. and Bouman, B.A. M., **Field Evapotranspiration Estimation in Central Luzón, Philippines, Using Different Sensors: Landsat 7 ETM+, Terra Modis and Aster**; Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications. Ottawa-Canadian .7 p. 2002.

Huete, A. Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X., Ferreira, L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of the Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 195-213, Nov. 2002.

Jackson, R. D. ; Idso, S. B. ; Reginato, R. J. Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. *Water Resources Research*. V. 13, n.3, p. 651-656, 1977.

Jackson, R. D. ; Idso, S. B. ; Reginato, R. J. ; Pinter Jr; P. R. **Canopy temperature as a crop water stress indicator**. *Water Resources Research*. V. 17, n.4, p.1133-1138, 1981.

Justice, C.O.; Giglio, B.; Korontzi, S.; Owens, J.; Morisette, J.T.; Roy, D.P.; Descloitres, J.; Alleaume, S.; Petitcolin, F.; Kaufman, Y. The MODIS fire products. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2 :p. 244-26, 2002.

Justice, C.O.; Vermote, E.; Townshend, J. R.G.; DeFries, R.; Roy, P.D; Hall, D.K, Salomonson, V.; Privette, J.L.; Riggs, G.; Strahler, A.; Lucht, W.; Myneni, B; Knyazikhin, Y.; Running, W.S.; Nemani, R.R.; Wan, Z.; Huete, A.R.; Leeuwen, W.V.; Wolfe, R.E.; Giglio, L.; Muller, J.P; Lewis, P.; Barnsley, M. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.36, n.4, p.1228-1247, July, 1998.

Menenti, M. Irrigation and Drainage. In Schutz, G. A. ; Engman, E. T. (Eds). Remote Sensing in Hydrology and water management. Berlin, Germany: Springer, 2000. cap. 17, p. 217-238. 2000

Morgan, M. S. ; Jackson, R. D. ; Raymond L. ; Gay L. ; Slater P. **Mapping surface energy balance components by combining Landsat Thematic Mapper and groundbased meteorological data**. Remote Sensing of Environment, V. 30, p. 77-87, 1989.

Kampel M. Características gerais dos satélites NOAA: histórico, instrumentos e comunicação de dados. In: Ferreira, N.J. (coordenador) . Aplicações ambientais Brasileiras dos satélites NOAA e TIROS-N. Oficina de textos. São Paulo, SP. 271. 2004.

Kustas, W.; Perry, E.; Doraiswamy, P.; Moran, M.S. Using satellite remote sensing to extrapolate evapotranspiration estimates in time and space over a semiarid rangeland basin. Remote Sensing of environment. V. 49, p. 275-286, 1994.

Roerink G. J.; Bastiaanssen, W.G.M.; Chambouleyron, J.; Menenti, M. **Relating Crop Water Consumption to Irrigation Water Supply to Remote Sensing**. Water Resources Management, No 11, p. 445-465. 1977.

Salomonson, V.V.; Barker, J.L. EOS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer: phase C/D status and comments on calibration and georeferencing approaches. In: Annual AAS Guidance and Control Conference, 15., Keystone, CO, Feb. 8-12, 1992. **Proceedings**. Keystone: AAS, 1992. Paper AAS 92-004.

Seguin, B.; Assad, E.; Freteaid, J. P.; Imbernon, J.; Kerr, Y.; Lagouarde, J.P. Use of meteorological satellites for water balance monitoring in Sahelian regions. International Journal of remote Sensing. V. 10, n.6, p. 1101-1117, 1989.

Seguin, B.; Lagouarde, J.P.; Savane, M. The assessment of regional crop water conditions from meteorological satellite thermal infrared data. Remote Sensing of Environment. V. 35, n.2-3, p. 141-148, 1991.

Soer, G. J.R. **Estimation of Regional Evapotranspiration and Soil Moisture Conditions Using Remotely Sensed Crop Surface Temperature**. Remote Sensing Environment. n.9. p. 27-45. 1980.

Strahler, A.; Townshend, J.R.G.; Muchoney, D.; Borak, J.; Friedl, M; Gopal, S.; Hyman, A.; Moody, A.; Lambin, E. **MODIS land cover product algorithm theoretical basis document (ATBD)**. Version 4.1. Washington: NASA, 102p. EOS-MTPE, Documentation.. 1996.

Telles, J.; Samii, M.V.; Doll, C.E. Overview of TDRSS. **Advances in Space Research**, v.16, p.1267-1276, 1995.

Timmermans, W.J. and Meijerink, A. M.J. **Remotely Sensed Actual Evapotranspiration: Implications for Groundwater Management in Botswana**. *Journal of Applied Geohydrology*. N0 1, p. 222-233. 1999.