

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
CURSO DE MESTRADO EM IRRIGAÇÃO E DRENAGEM**

MARCOS MEIRELES

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL PELO
EMPREGO DO ALGORITMO SEBAL E IMAGEM
LANDSAT 5 - TM NA BACIA DO ACARAÚ - CE**

**FORTALEZA
2007**

MARCOS MEIRELES

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL PELO
EMPREGO DO ALGORITMO SEBAL E IMAGEM
LANDSAT 5 - TM NA BACIA DO ACARAÚ - CE**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Agronomia do Centro de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Agronomia. Área de concentração: Irrigação e Drenagem.

Orientadora: Profa. Eunice Maia de Andrade, Ph.D. - UFC

FORTALEZA

2007

M453e Meireles, Marcos

Estimativa da evaporação real pelo emprego do algoritmo SEBAL e imagem landsat 5-TM na Bacia do Acaraú - CE [manuscrito] / Marcos Meireles

89 f., il. color., enc.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007

Orientadora: Eunice Maria de Andrade

Co-orientador: Bernardo Barbosa da Silva

Área de concentração: Irrigação e Drenagem

1. SEBAL 2. Micrometeorologia 3. Sensoriamento remoto I. Andrade, Eunice Maria de II. Universidade Federal do Ceará – Mestrado em Agronomia III. Título

CDD 631

MARCOS MEIRELES

ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL PELO
EMPREGO DO ALGORITMO SEBAL E IMAGEM
LANDSAT 5 - TM NA BACIA DO ACARAÚ - CE

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em
Agronomia do Centro de Ciências Agrárias, da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do
grau de Mestre em Agronomia. Área de concentração:
Irrigação e Drenagem.

APROVADO EM: __ / __ / ____

BANCA EXAMINADORA

Profa. Eunice Maia de Andrade, Ph.D. - UFC
(Orientadora)

Prof. Bernardo Barbosa da Silva, Dr. - UFCG
(Co-orientador)

Prof. Thales Vinícius de Araújo Viana, Dr. - UFC
(Conselheiro)

DEDICO

À minha mãe, Fatima Meireles
À minha esposa Carmélia Santos
A meus avós maternos, João Claudino Moura
e Maria Claudino Moura (*in memoriam*)

AGRADECIMENTOS

A Deus, pois sem ele não existiria vida.

A meus pais, irmãos e demais familiares pelo apoio e confiança que a mim dedicaram.

À Universidade Federal do Ceará – UFC, através do Departamento de Engenharia Agrícola, pela forma calorosa de acolhimento e condução educacional.

Aos professores:

- ✓ Benito de Azevedo : por ter me indicado a primeira oportunidade de pesquisa (graduação);
- ✓ Raimundo Nonato Távora Costa : por ter me acolhido e conduzido nesta primeira caminhada (graduação);
- ✓ Adunias dos Santos Teixeira : por ter me incentivado a ingressar no mestrado e por ter iniciado minha orientação;
- ✓ Claudivan, Marcus Bezerra, Renato, Thales, Moreira, Omar, etc, pelo convívio pacífico e frutífero.

A Professora Eunice Maia de Andrade (em especial) por estar tão presente e decidida a me levar até o fim desta caminhada, com dedicação, esmero e amizade.

Aos colegas e amigos do mestrado: Alexandre Maia, Alves Neto, Antônio Evami, Carlos Henrique, Denise Vasconcelos, Eliana Lee, Esaú Ribeiro, Francisco Sildemberny, Helba Araújo, Itamar Frota, Jefferson Nobre, José Otacílio, Karine Rodrigues, Lílian Cristina, Marcos Mesquita, Mauro Regis, Moacir Rabelo, Paulo Cairo, Robson Alexsandro e Thales Gomes, pela certeza de um novo encontro.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará pela amizade e presteza profissional.

Aos orientados da Profa. Eunice: Deodato, Fernando, Fredson, Lobato, Joseílson e Nilson pelo companheirismo na sala de estudo/trabalho.

A minha esposa Carmélia Santos Araújo pelo companheirismo e incentivo em minha vida acadêmica, social e pessoal.

Às amigas Denise Feijó, Virgínia Cláudia e Ana Mônica pelo companheirismo e cumplicidade na vida.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de estudo concedida na graduação (Pibic) e pós-graduação.

Cada coisa tem sua hora e cada hora o seu caminho.
(Rachel de Queiroz)

SUMÁRIO

LISTAS DE FIGURA

LISTAS DE TABELAS

RESUMO

ABSTRACT

1 – INTRODUÇÃO	14
2 - REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1 - Sensoriamento remoto.....	16
2.2 – Satélites.....	18
2.2.1 - Programas espaciais de interesse para o Brasil	18
2.2.1.1 - A missão espacial completa brasileira (MECB).....	19
2.2.1.2 - O satélite Argentino-Brasileiro de informações sobre água, alimento e ambiente (SABIA ³)	20
2.2.1.3 - Programa China-Brazil earth resources satellite (CBERS).....	21
2.2.2 - Outros programas espaciais importantes.....	21
2.2.2.1 - NOAA-AVHRR.....	21
2.2.2.2 - O programa Landsat.....	22
2.3 - Geoprocessamento e recursos naturais	23
2.4 - Balanço de energia.....	25
2.5 – Evapotranspiração	27
2.6 – SEBAL	30
3 - MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1 - Características da área de estudo	33
3.2 - Dados empregados no trabalho	38
3.3 - O algoritmo SEBAL	40
3.4 - Evapotranspiração diária (mm.dia ⁻¹).....	53
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1 - Elementos que compõem o saldo de radiação (R_n)	55
4.1.1 - Albedo (α).....	55
4.1.2 - Radiação de onda longa emitida ($R_{L\uparrow}$).....	58
4.1.3 - Saldo de radiação (R_n).....	59
4.2 - Fluxo de calor no solo (G).....	62
4.3 - Calor sensível (H)	64
4.4 - Calor latente (λET)	68
4.5 – Evapotranspiração	72
5 – CONCLUSÕES	78
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
APÊNDICES	87

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Espectro eletromagnético.....	17
FIGURA 2 - Fluxo de radiação com sua distribuição na atmosfera.....	27
FIGURA 3 - Fluxograma com as etapas de processamento do balanço de radiação à superfície.....	31
FIGURA 4 - Localização da área de estudo na bacia do Acaraú.....	34
FIGURA 5 - Açudes: Jaibaras (a), Paulo Sarasate (b), Edson Queiroz (c) e Forquilha (d).....	35
FIGURA 6 - Precipitações registradas de agosto/2004 a fevereiro/2006 nos municípios de Acaraú (a), Sobral (b), Groaíras (c) e Sta Quitéria (d).....	37
FIGURA 7 - Mapa de solos da bacia do Acaraú.....	37
FIGURA 8 - Exemplo de cálculo de “a” e “b”, para cômputo de “dT”.....	49
FIGURA 9 - Fluxograma com as etapas da iteração para obtenção da carta de H.....	52
FIGURA 10 - Mapa do albedo à superfície do solo no terço médio da bacia do Acaraú, Ceará. Data: 01/09/2004.....	56
FIGURA 11 - Rio Goaíras, afluente da margem esquerda do Acaraú, perenizado pelo açude Edsno Queiroz, 2005.....	57
FIGURA 12 - Campo de mineradora de granito (361327,425; 9541768,518), município de Santa Quitéria, 2007.....	58
FIGURA 13 - Mapa da radiação de onda longa ($W.m^{-2}$) liberada pela superfície no terço médio da bacia do Acaraú, Ceará. Data: 01/09/2004.....	59
FIGURA 14 - Mapa do saldo de radiação à superfície do solo ($W.m^{-2}$) no terço médio da bacia do Acaraú, Ceará. Data: 01/09/2004.....	60
FIGURA 15 - Histograma de frequência do saldo de radiação para o dia 01/09/2004.....	61
FIGURA 16 - Cena do fluxo de calor no solo ($W.m^{-2}$) para o dia 01/09/2004.....	63
FIGURA 17 - Histograma de frequência do fluxo de energia no solo (G) para o dia 01/09/2004.....	64
FIGURA 18 - Imagem do calor sensível ($W.m^{-2}$) para o dia 01/09/2004.....	66
FIGURA 19 - Imagem da área considerada como o pixel quente.....	67
FIGURA 20 - Histograma de frequência do calor sensível (H) para o dia 01/09/2004.....	68
FIGURA 21 - Imagem do fluxo de calor latente ($W.m^{-2}$) para o dia 01/09/2004.....	69

Figura 22 - Cobertura vegetal da bacia: (a) - caatinga composta com espécies arbóreas e arbustivas de maior densidade (373435.50; 9554096.35); (b) - cobertura com espécies de menor porte, totalmente isenta de folha (337903.00; 9564712.00); (c) - caatinga com maior densidade de espécies arbóreas (334603.04; 9572481.96); (d) - mata ciliar do rio jacurutu (oiticica, ingazeira 355152.88, 9530403.27); (e) - mata ciliar do riacho dos macacos (predominância de cobertura oiticicas 335695.56, 9556232.28) e (f) - queimadas para introdução de cultura de subsistência (milho x feijão) (335126.58; 9568507.55).....	70
FIGURA 23 - Histograma de frequência do calor latente (λET) para o dia 01/09/2004....	71
FIGURA 24 - Imagem da fração da evapotranspiração de referência horária para o dia 01/09/2004.....	74
FIGURA 25 - Histograma de frequência da fração da evapotranspiração de referência horária (FET_H) para o dia 01/09/2004	74
FIGURA 26 - Imagem da $ET_{diária}$ ($mm.dia^{-1}$) para o dia 01/09/2004	76

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Situação dos satélites que compõem a família Landsat.....	23
TABELA 2 - Informações dos açudes de maior importância na bacia do Acaraú.....	33
TABELA 3 - Características espectrais e espaciais do sensor TM e suas aplicações	39
TABELA 4 - Informações dos municípios e período de coleta dos dados	40
TABELA 5 - Descrição das bandas TM do Landsat 5, com intervalos de comprimento de onda, coeficientes de calibração (mínima [a] e máxima [b]) e irradiância espectral no topo da atmosfera (TOA)	41
TABELA 6 - Estatística descritiva dos componentes do saldo de radiação na superfície para o terço médio da bacia do Acaraú. Data: 01/09/2006	62
TABELA 7 - Valores dos parâmetros que identificam as condições extremas, pixels âncora, da imagem no dia 244 do calendário Juliano. Data: 01/09/2004	65
TABELA 8 - Estatística descritiva dos componentes do balanço de radiação na superfície para o terço médio da bacia do Acaraú. Data: 01/09/2004.....	72
TABELA 9 - Valores de $ET_{diária}$, ET_0 diária e FET_H para o dia de passagem do satélite (01/09/2004)	77

RESUMO

Tomando-se por base o emprego crescente do sensoriamento remoto na elaboração de mapas mais precisos e de menor custo dos recursos naturais, desenvolveu-se este estudo com o objetivo de se elaborar imagens que venham a identificar o balanço de energia na superfície, bem como estimar as taxas evaporimétricas horária e diária da região que abrange o Perímetro de Irrigação Araras Norte e os quatro principais reservatórios (Jaibaras, Paulo Sarasate, Edson Queiroz e Forquilha) da bacia do Acaraú. Para tanto, imagem do satélite Landsat 5, datada de 01 de setembro de 2004, foi obtida junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Esta imagem foi submetida, processada e empilhada pelo software Erdas IMAGINE 8.5 Demo. Em seguida aplicou-se o algoritmo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land), o qual se fundamenta no fluxo de calor entre a superfície do solo e a atmosfera, para se estimar a evapotranspiração horária e diária da área em estudo. Pelo emprego do referido algoritmo foram geradas cartas, dentre outras, da temperatura ($^{\circ}\text{C}$), albedo (α), Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), saldo de radiação (R_n), calor sensível (H), calor latente (λET) e evapotranspiração horária ($ET_{\text{horária}}$). De posse da carta da $ET_{\text{horária}}$, estimou-se a fração de evapotranspiração de referência horária (FET_{0_H}), pela relação dos valores da evapotranspiração de cada pixel da imagem estimada pelo SEBAL e a evapotranspiração de referência horária (ET_{0_H}), estimada pelo método de Penman-Montheith.

Pelos resultados alcançados observou-se que os menores percentuais de energia refletida (albedo) e as maiores taxas de evaporação foram registrados nas superfícies líquidas dos açudes ($7,5 \text{ mm.dia}^{-1}$); que a distribuição espacial do fluxo de calor no solo apresentou uma repartição semelhante às manchas dos dois tipos de solo predominantes da área em estudo, Luvisolo e Neossolo Litólico. Pode-se, também, perceber a influência da perenização dos cursos d'água na umidade do solo das margens, encontrando-se para alguns trechos da mata ciliar valores de NDVI e de evapotranspiração diária bem próximos dos observados nas áreas irrigadas. As áreas do Distrito de Irrigação Araras Norte apresentaram $ET_{\text{diária}}$ da ordem de $6,5 \text{ mm.dia}^{-1}$. Ficou evidenciado a alta potencialidade do emprego do SEBAL em estudos de desertificação, alterações na vegetação e uso da terra em escala de bacias hidrográficas, uma vez que a identificação em mudanças das espécies pode ocorrer pelo estudo das cartas de calor latente ou evapotranspiração.

Palavras-chave: SEBAL, micrometeorologia, sensoriamento remoto.

ABSTRACT

Elaboration of natural resources mapping is difficult due to large spatial and temporal variability of them. In the least decay, remote sensing is widely used do make this because the lower survey costs. The main goal of this work is to estimate daily evapotranspiration of the Araras Norte Irrigated Perimeters and evaporation of four reservoirs (Jaibaras, Paulo Sarasate, Edson Queiroz and Forquilha) located in the middle part of the Acaraú basin. The actual evapotranspiration was quantified from spectral satellite data on the basis of the energy balance approach. The LANDSAT 5 Thematic Mapper 30 m, resolution satellite image taken on 01 september 2004, was obtained from Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Satellite image was processed and piled up using Erdas Imagine 8.5 Demo. Hour and daily evapotranspiration was estimated using SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) algorithm, which is based on energy balance between incoming and outgoing solar radiation. Among generated remote sensing maps are: temperature ($^{\circ}\text{C}$), Albedo (α), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), net radiation (R_n), sensible heat flux (H), latent heat flux (LE_T) and hour evapotranspiration (ET_H). Based on ET_H the evaporative fraction was estimated throughout the relationship of ET for pixel at the satellite image time ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$) and reference crop ET by Penman-Montheith method.

Results showed that the lowest albedo and the highest evapotranspiration rates were registered in the reservoir ($7.5 \text{ mm}\cdot\text{dia}^{-1}$); the spatial distribution of soil heat flux presented a similar distribution of soil predominant types in the studied region. Also, It was observed the influence of water flow in the repair zone soil humidity, once it was registered, in these areas, values of NDVI and daily evapotranspiration similar to those observed in irrigated areas. Irrigated District of Araras Norte showed an $ET_{\text{diária}}$ around $6.5 \text{ mm}\cdot\text{dia}^{-1}$. It was clear that SEBAL approach has a high potential in study of desertification, changes in cover vegetation and land use at basin scales; since latent heat and evapotranspiration can be a good indication of changed cover vegetation change.

Keyword: SEBAL, micrometeorology, remote sensing

1. INTRODUÇÃO

A demanda crescente pela água por parte da população mundial nas últimas décadas vem incentivando a sociedade e os pesquisadores da necessidade de se buscar um modelo mais eficiente para a exploração dos recursos hídricos. A falta de um bom planejamento do sistema hídrico e o desconhecimento sobre os processos industriais e agroindustriais elevam o consumo de água de boa qualidade para usos não tão exigentes, elevando, sem necessidade efetiva, os investimentos e os custos de tratamento de água e de efluentes. Por não adotar um método de controle de irrigação, usualmente o produtor rural irriga em excesso, temendo que a cultura sofra estresse hídrico, que poderia comprometer a produção. Este excesso tem, como consequência, o desperdício de energia em bombeamento desnecessário de água. Para exemplificar, um milímetro de lâmina excedente em uma área irrigada por um pivô central de 100 ha, representa a condução desnecessária de um milhão de litros de água, que consome, em média, 400 kWh de energia elétrica. É necessário, portanto, manejar racionalmente a irrigação para que se evite o mau uso de fatores de produção tão essenciais como água e energia (FARIA et al., 2002). Somente com uma gestão integral do processo produtivo, pode-se pensar numa solução adequada e sustentável para o problema de escassez de água em regiões do semi-árido nordestino. Para isto, é necessária uma ampla participação das comunidades envolvidas, incluindo treinamento e a conscientização das mesmas através de programas de educação ambiental (FILHO, 2005). Esta busca assume uma maior importância nas regiões áridas e semi-áridas do globo, as quais se caracterizam pelo déficit hídrico ao longo de quase todo o ano. Nessas regiões, a produção de alimento, em uma maior escala e com uma maior segurança de sucesso ocorre através da irrigação. Por outro lado, o crescimento, em larga escala, da agricultura irrigada nas regiões secas do globo vem promovendo a substituição de baixas taxas de evapotranspiração por altas taxas, em uma superfície de, aproximadamente, 110 milhões de hectares (WICHELNS et al., 2002). Isto ocorre devido a grande quantidade de energia radiante disponível para ser empregada no processo da evapotranspiração.

O Estado do Ceará, região Nordeste do Brasil, é conhecido pelo volume de água armazenado em reservatórios artificiais, chegando a 8.000 reservatórios, sendo que os 126 maiores têm suas vazões monitoradas pela Companhia de Recursos Hídricos do Estado (COGERH, 2001). Os açudes públicos do Ceará armazenam um total de 12 bilhões de metros cúbicos, os quais têm suas águas destinadas ao consumo humano, dessedentação, indústria e irrigação.

A agricultura irrigada no Ceará tem se expandido nos últimos anos, principalmente na bacia do Acaraú, onde se encontram implantados quatro perímetros públicos de irrigação. A capacidade total de acumulação da bacia é de aproximadamente 1.215.390.000 m³, tendo como principais açudes: o Paulo Sarasate no rio Acaraú, município de Varjota, com capacidade de 860,96 milhões de m³; o Edson Queiroz, localizado no rio Groaíras, município de Santa Quitéria, com capacidade de 250 milhões de m³; e o Jaibaras no rio de mesmo nome, município de Sobral com capacidade de 104,43 milhões de m³ (COGERH, 2001). Esta bacia começa a despontar como uma área promissora para a agricultura irrigada no Ceará, principalmente com o cultivo de fruteiras sob irrigação.

Além da disponibilidade hídrica existente na bacia do Acaraú, alguns fatores adicionais têm contribuído para essa expansão, entre os quais pode-se citar: a própria condição climática da região, a qual apresenta-se adequada para o cultivo irrigado, principalmente frutíferas como banana, manga, mamão, coco, abacaxi, melão e algumas variedades de uva; a própria demanda interna tanto regional como nacional, como a demanda externa por frutas e flores tropicais, bem como, o empreendedorismo de jovens produtores rurais da região. Entretanto, não se pode esquecer que o fator água, por seu uso múltiplo e escala de prioridade, é um elemento fundamental na tomada de decisão, principalmente em regiões áridas e semi-áridas onde as taxas de evapotranspiração são muito elevadas. Bezerra & Oliveira (1999) e Filho (2005) desenvolveram trabalhos de estudo das taxas de evapotranspiração em regiões semi-áridas.

Recentes avanços da aplicação do sensoriamento remoto na elaboração de mapas vêm se constituindo em uma técnica mais rápida, precisa e de menor custo no monitoramento dos processos que definem a dinâmica dos recursos naturais e na identificação da fragilidade dos mesmos. Nóbrega et al. (2004) e Gomes (2000) são alguns autores que utilizam esta tecnologia. Tomando-se por base o emprego crescente do sensoriamento remoto nos recursos naturais, desenvolveu-se este estudo objetivando identificar as taxas evaporimétricas horária e diária do terço médio da bacia do pelo emprego do algoritmo SEBAL e imagem do satélite Landsat 5 (TM).

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Sensoriamento Remoto

O conceito em si, de sensoriamento remoto, é muito amplo; no entanto, cada área da ciência possui seu próprio conceito. Novo (1992), após algumas considerações, definiu sensoriamento remoto como sendo a utilização conjunta de modernos sensores, equipamentos para processamento e transmissão de dados, de aeronaves, de espaçonaves etc., com o objetivo de estudar o ambiente terrestre através do registro e da análise das interações entre e a radiação eletromagnética as substâncias componentes do planeta Terra em suas mais diversas manifestações. O princípio fundamental desta ferramenta é a obtenção de informações de um determinado alvo (cidades, vegetação, reservatórios, rios, etc.) através de dados coletados a distância por sensores, seja ele espacial ou terrestre.

A obtenção da primeira imagem fixada pela luz, princípio da máquina fotográfica, em 1822 por um francês, Joseph Nicéphore Niépce, proporcionou o início da idéia de sensoriamento remoto por meio das primeiras experiências com fotografias registradas na história. A partir desse momento, vários estudos permitiram aprimorar a idéia. Porém, só em 1856, uma câmera foi colocada em um balão e assim, tirada a primeira foto aérea. Este feito foi atribuído ao, também francês, Gaspar Felix Tournachon, que tirou a primeira foto aérea da cidade de Paris a bordo de um balão. Com o passar dos tempos, estudos e experiências com máquinas fotográficas a bordo de outras máquinas voadoras (dirigíveis, aviões, satélites, etc) foram realizados e até hoje têm sido usados com o objetivo de mapear e estudar a superfície terrestre e seus fenômenos.

A base da tecnologia de sensoriamento remoto é a detecção das alterações sofridas pela radiação eletromagnética quando esta interage com os componentes da superfície terrestre (alvos) (MENDES & CIRILO, 2001), ou seja, os fundamentos do sensoriamento remoto estão ligados à emissão de luz solar e sua reflexão por diversos alvos da superfície da terra. Neste momento, quando a luz é refletida, cada alvo (rio, vegetação, etc) interage com a radiação incidente e a reflete de modo particular, que é captado pelos sensores (fotográficos, espaciais ou radiofrequência) e armazenado para posterior processamento e interpretação. Desta maneira, gera-se um, ou um conjunto de mapas que servirão de suporte para a tomada de decisão.

Existem dois tipos de sensores, os passivos e os ativos. Os sensores passivos (satélites, máquinas fotográficas, etc) não produzem fonte de energia, necessitando de uma fonte natural (Sol) ou artificial (lâmpada) para que possam captar a energia refletida dos alvos em forma de

ondas eletromagnéticas. Já os sensores ativos (radar, sonar, etc) emitem energia em forma de ondas eletromagnéticas que são refletidas e captadas posteriormente.

O espectro eletromagnético (Figura 1) é uma escala contendo os diversos comprimentos de onda emitidos e recebidos por um sensor, e está compreendido desde as ondas de raio gama ($0,01\text{\AA}$ a 1\AA) até as ondas de rádio (1m a 100 km). Dentro deste espectro, encontramos a faixa compreendida entre $0,30\text{ }\mu\text{m}$ e $15\text{ }\mu\text{m}$, representando o espectro óptico.

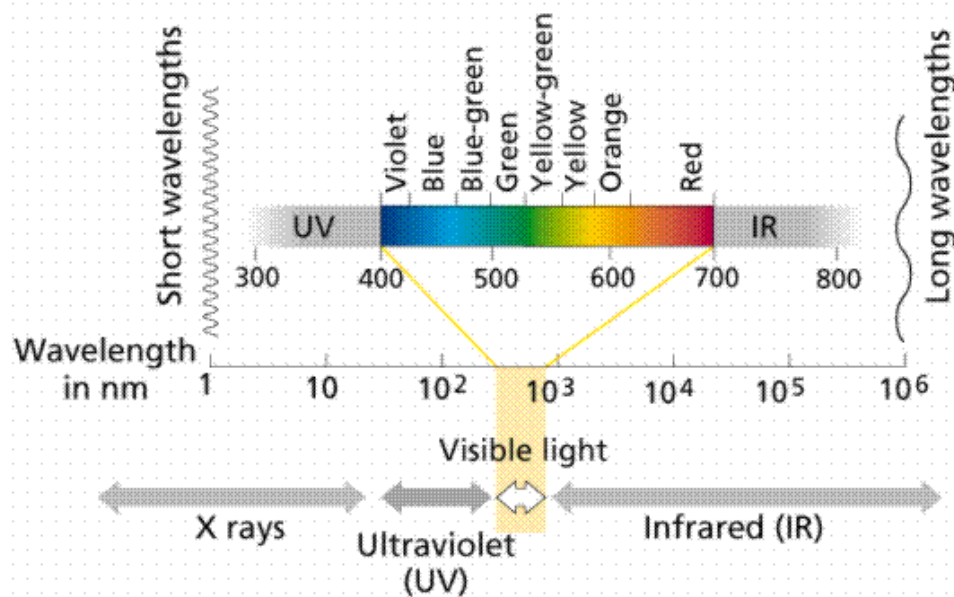


FIGURA 1: Espectro eletromagnético

Ainda segundo Mendes & Cirilo (2001), os sistemas sensores que operam na região óptica do espectro podem ser classificados em função do tipo de energia que detectam como sensores termais e sensores de energia solar refletida. O espectro de energia refletida divide-se em visível ($0,38\text{ }\mu\text{m}$ a $0,72\text{ }\mu\text{m}$), infravermelho próximo ($0,72\text{ }\mu\text{m}$ e $1,3\text{ }\mu\text{m}$) e infravermelho médio ($1,3\text{ }\mu\text{m}$ e $3,0\text{ }\mu\text{m}$). Os sensores termais operam na região do infravermelho distante ($7\text{ }\mu\text{m}$ e $15\text{ }\mu\text{m}$).

Em sensoriamento remoto, a resolução se apresenta em três independentes tipos: resolução espacial, resolução espectral e resolução radiométrica, informa Crósta (1992). A primeira (resolução espacial) é definida pela capacidade do sistema sensor em “enxergar” objetos na superfície terrestre; quanto menor o objeto possível de ser visto, maior a resolução espacial. A segunda (resolução espectral) é inerente às imagens multiespectrais e é definida pelo número de bandas espectrais de um sistema sensor e pela largura do intervalo de comprimento de onda coberto por cada banda; quanto maior o número de bandas e menor a largura do intervalo, maior é a resolução espectral de um sensor. Exemplificando o conceito de bandas,

temos o caso de duas fotografias do mesmo objeto; uma preto e branco (uma banda espectral: tons de cinza) e colorida (três bandas espectrais: vermelha, azul e verde). A resolução radiométrica é dada pelo número de níveis digitais, representando níveis de cinza, usados para expressar os dados coletados pelo sensor; quanto maior o número de níveis, maior é a resolução radiométrica. Além dessas resoluções, temos também a resolução temporal, que se refere ao tempo de revolução do satélite ao redor da terra, ou seja, o tempo em que, tomada uma determinada imagem, transcorre até que uma segunda imagem do mesmo ponto seja tomada.

2.2. Satélites

A guerra fria travada entre os Estados Unidos e a União Soviética foi o ponto de partida para o desenvolvimento da tecnologia aeroespacial. Neste contexto, os satélites inicialmente serviram para fins militares: porém, com o fim dos conflitos, outras aplicações foram atribuídas a esta ferramenta de imensa importância. Os satélites atuais utilizados na agricultura, meteorologia e em diversas outras áreas devem muito à Guerra Fria que, investindo na espionagem, foi a maior incentivadora das tecnologias de sensoriamento remoto.

Atualmente, uma das principais aplicações desta tecnologia é o monitoramento da condição ambiental terrestre, onde vários segmentos profissionais estão envolvidos, todos interligados, gerando ainda mais informação a respeito de determinado tema. Ferreira (2004) aborda a utilização das imagens dos satélites NOAA e TIROS-N no monitoramento de queimadas na Amazônia, cálculo de índice de vegetação a partir do sensor AVHRR, balanço de radiação com dados AVHRR/NOAA14, monitoramento de bóias e animais, etc. Inúmeros programas espaciais já foram criados possuindo objetivos diversos. Alguns países, através de tratados internacionais, possuem programas espaciais que visam, da melhor maneira possível, adquirir informações sobre diversos recursos naturais, a fim de proporcionar um melhor entendimento sobre os fenômenos atmosféricos, bem como obter informações regionais que influem e proporcionam tomadas de decisões para a melhor administração desses recursos.

2.2.1. Programas espaciais de interesse para o Brasil

A tecnologia espacial é de interesse da grande maioria dos países. Porém, a situação econômica de um país pode determinar o tipo de investimento a se fazer para aquisição desta tecnologia. A opção por fazer parcerias com países de mesmo nível econômico é válida, desde

que os benefícios sejam compartilhados de formas iguais. O Brasil tem relacionamentos nesta área com diversos países, a fim de manter projetos espaciais que atendam as necessidades técnicas destes. Entre estes diversos países, pode-se citar: Argentina, Alemanha, China, Ucrânia, Rússia. Abaixo são citados alguns dos projetos mantidos pelo Brasil, em parcerias internacionais.

2.2.1.1. A missão espacial completa brasileira (MECB)

Projeto do governo brasileiro coordenado pela Agência Espacial Brasileira (AEB) com objetivo de promover o avanço da tecnologia espacial através do desenvolvimento de um foguete lançador (VLS) para satélites de pequeno porte e de dois tipos de satélites experimentais.

Este programa da Missão Espacial Completa Brasileira (MECB) em parceria com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) visa a integração, testes e operação em órbita de quatro satélites: três de Coleta de Dados (SCD1, SCD2 e SCD3) e dois de Sensoriamento Remoto da Terra (SSR1 e SRR2).

- Satélites de Coleta de Dados (SCDs)

O primeiro sistema espacial de uso de dados obtidos por satélite no país foi protagonizado pelos Satélites de Coleta de Dados (SCDs 1 e 2). De dimensões aproximadas a 1 m³, esses artefatos funcionam como retransmissores de informações para centros de recepção em Cuiabá (MT) e Alcântara (MA). Os dados são de natureza hidrológica ou ambiental, dependendo do tipo de plataforma que enviou a informação para o satélite. Eles estão em operação respectivamente desde 1993 e 1998. Entre os maiores usuários estão a Agência Nacional de Águas (ANA), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e o Sistema de Vigilância da Amazônia (Sivam) (MCT, 2006). Seu lançamento ocorreu em 9 de fevereiro de 1993, com a utilização do foguete PÉGASUS, da empresa norte-americana Orbital Sciences, acoplado a um avião B52, desde o Centro Espacial Kennedy, na Flórida, USA. Sua órbita foi escolhida de forma a cobrir inteiramente o território brasileiro. O satélite SCD-2A foi lançado em novembro de 1997, com a utilização do Veículo Lançador de Satélite - VLS, desenvolvido por técnicos do Centro Técnico Aeroespacial - CTA. Infelizmente, uma falha em um dos foguetes obrigou a abortar o lançamento 6 minutos após a decolagem (INPE, 2006a). Sua principal missão é a transmissão de

dados ambientais. Essa transmissão é feita em duas frequências adjacentes que promovem um serviço aleatório a centenas de Plataformas de Coleta de Dados (PCDs) instaladas em locais remotos.

Alguns dados transmitidos são: temperatura e umidade relativa do ar; direção e velocidade do vento; pressão atmosférica; nível de chuva acumulado; nível de rios, lagos e reservatórios; quantidade de radiação solar incidente ou refletida; temperatura do solo; fluxo de calor no solo; parâmetros físicos de qualidade da água (turbidez, pH, temperatura, etc); parâmetros físicos relacionados com a química atmosférica (concentração de CO₂, ozônio, monóxido de carbono, etc).

- Satélites de Sensoriamento Remoto (SSRs)

Sua finalidade principal é o monitoramento ambiental da região Amazônica e deverá ter baixa órbita equatorial (~900 km de altitude) com revisitas a cada 2 h aproximadamente. As bandas espectrais propostas com suas respectivas resoluções espaciais são: SB1 (440 a 505 nm; 70 m), SB2 (530 a 575 nm; 70 m), SB3 (650 a 680 nm; 70 m), SB4 (845 a 885 nm; 70 m), SB5 (895 a 990 nm; 300 m), SB6 (3400 a 4200 nm; 600 m) (INPE, 2006b).

2.2.1.2. O satélite Argentino-Brasileiro de informações sobre água, alimento e ambiente (SABIA³)

Esse satélite Argentino-Brasileiro capta informações sobre água, alimentos e ambiente. É o resultado de uma cooperação técnica entre o INPE e a Comissão Nacional de Atividades Espaciais (CONAE), da Argentina. Possui seis bandas espectrais, onde as quatro primeiras (azul, verde, vermelho e infravermelho próximo) têm resolução espacial de 80 m², a banda infravermelho médio, apresenta uma resolução de 160 m² e a pancromática de 40 m². Sua órbita polar (98,5°) é heliosíncrona, passando pelo equador às 11:00 h (horário local) e sua resolução temporal é de 3 dias, podendo ser diário se necessário. A vida útil está prevista em 4 anos e o tempo de execução da missão deverá ser de pelo menos 5 anos, com custo de aproximadamente US\$ 60 milhões.

2.2.1.3. Programa China-Brazil Earth Resources Satellite (CBERS)

No intuito de driblar as barreiras impostas por países desenvolvidos, com relação ao desenvolvimento e transferência de tecnologias sensíveis, a China e o Brasil assinaram em 06 de julho de 1988 um acordo de parceria envolvendo o INPE e a Academia Chinesa de Tecnologia Espacial (CAST) para que fossem desenvolvidos dois satélites avançados de sensoriamento remoto.

A órbita é heliosíncrona a uma altitude de 778 km, completando aproximadamente 14 revoluções por dia, cruzando o equador aproximadamente às 10:30 h (horário local), permitindo as mesmas condições de luz para posterior comparação de imagens. A bordo do CBERS 1 e 2, estão a câmera imageadora de alta resolução (CCD - High Resolution CCD Camera), o imageador de amplo campo de visada (WFI - Wide Field Imager) e o imageador por varredura de média resolução (IRMSS - Infrared Multispectral Scanner) (EMBRAPA, 2006a). Mais detalhes sobre esses sensores estão no Apêndice A.

O autor supracitado informa ainda que as equipes técnicas de ambos os países concluíram estudos de viabilidade para a construção de mais dois satélites da família CBERS; o CBERS-3 e o CBERS-4, com a substituição da atual câmara CCD por outra com resolução de 5 metros. O lançamento do CBERS-3 está previsto para ocorrer em 2008 e o CBERS-4 em 2010.

2.2.2. Outros programas espaciais importantes

Embora o Brasil esteja mais interessado nos sistemas orbitais acima citados, outros sistemas orbitais são de interesse de entidades brasileiras, uma vez que as imagens obtidas são de suma importância para a realização de trabalhos complexos.

2.2.2.1. NOAA-AVHRR

Os Estados Unidos, em 01 de abril de 1960 lançou o satélite TIROS-1 (Television and Infrared Observation Satellite) com o objetivo de aquisição de imagens da cobertura de nuvens sobre a Terra, ao redor da maior parte do planeta. Os bons resultados obtidos fizeram com que houvesse uma evolução de uma série de satélites que rotineiramente monitoram a atmosfera terrestre, os continentes e os oceanos. O último satélite desta série foi o TIROS-10, sendo substituído por sua segunda geração, denominado ITOS - 1 (Improved TIROS Operational

System) em 23 de janeiro de 1970, que carregava a bordo um radiômetro de varredura que permitia medidas diurnas e noturnas com transmissão em tempo real e ao mesmo tempo armazenava dados para a posterior transmissão para estações terrestres. Com a evolução, o segundo satélite ITOS foi lançado em 11 de dezembro de 1970, passando a chamar-se NOAA-1 pelo fato de que sua administração foi assumida pela National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA. Este satélite carregava a bordo o radiômetro Very High Resolution Radiometer (VHRR), com varredura de dois canais sensíveis à energia no espectro visível (0,6 - 0,7 μm) e no infravermelho termal (10,5 - 12,5 μm); Scanning Radiometer (SR), com dois canais sensíveis à energia do espectro visível (0,5 - 0,7 μm) e infravermelho termal (10,5 - 12,5 μm); Vertical Temperature Profile Monitor (VTPR), projetado para medir radiância do infravermelho em oito canais espectrais entre 11,0 e 19,0 μm cujos dados podem ser usados para deduzir o perfil de temperatura atmosférica da coluna radiante; e o Solar Proton Monitor (SPM), que media o fluxo de partículas energéticas (prótons, elétrons, etc) em diferentes faixas.

Atualmente se encontram em funcionamento o NOAA-12, NOAA-16 e o NOAA-17, que possibilitam obter informações sobre uma mesma área seis vezes por dia. Seu principal sensor é o Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) que apresenta 5 bandas, sendo uma no espectro visível (0,58 - 0,68 μm); outra no infravermelho próximo (0,725 - 1,10 μm), fornecendo informações sobre o estado da vegetação e cobertura por nuvens; e três no infravermelho termal (3,55 - 3,93 μm ; 10,3 - 11,3 μm ; 11,5 - 12,5 μm), que são usados para avaliar a distribuição de temperaturas sobre o mar e terra, inclusive auxiliando na detecção de queimadas (UFRPE, 2006).

2.2.2.2. O programa Landsat

É um dos programas de maior sucesso dentre os existentes. Foi originalmente denominado Earth Resources Technology Satellite (ERST), inicialmente de caráter experimental, foi desenvolvido com o objetivo de aquisição de dados espaciais, espectrais e temporais da superfície terrestre de maneira global e repetitiva. Na Tabela 1 encontra-se uma cronologia da família LANDSAT, mostrando que o Landsat 5 é o único que ainda está em pleno funcionamento.

TABELA 1: Situação dos satélites que compõem a família Landsat.

SATÉLITE	LANÇAMENTO	SITUAÇÃO ATUAL
Landsat 1 (ERTS-1)	23/07/1972	Desativado em 06/01/1978
Landsat 2	22/01/1975	Desativado em 22/02/1982
Landsat 3	05/03/1978	Desativado em 31/03/1983
Landsat 4	16/07/1982	Não imagea, porém não está desativado
Landsat 5	01/03/1984	Ativo até o momento
Landsat 6	05/10/1993	Perdido após lançamento
Landsat 7	15/04/1999	Ativo até 30/05/03, após esta data, encontra-se trabalhando com imagens prejudicadas

Fonte: ENGESAT (2006)

Os Landsat 1, 2 e 3, tinham 2 instrumentos: a Câmera RBV (Return Bean Vidicon) e o MSS (Multispectral Scanner), sendo o RBV muito pouco utilizado devido à problemas técnicos. O Landsat 4 já possuía o instrumento TM (Thematic Mapper) além do MSS, que continuou no Landsat 5, 6 e 7.

O Landsat 7 é o mais recente satélite em operação, tendo sido lançado em abril de 1999, levava a bordo o sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) que tem uma banda pancromática com resolução espacial de 15 m, canal no infravermelho termal com resolução de 60 m, calibração radiométrica a bordo para todas as bandas, além das demais bandas do TM com resolução de 30 m. As imagens adquiridas por este sensor apresentam a melhor relação custo/benefício entre os dados gerados por satélites de média resolução (15 a 30 m) atualmente oferecido no mercado (EMBPRAPA, 2006b).

Algumas aplicações das imagens Landsat: acompanhamento do uso agrícola das terras; apoio ao monitoramento de áreas de preservação; atividades energético-mineradoras; cartografia e atualização de mapas; desmatamentos; detecção de invasões em áreas indígenas; dinâmica de urbanização; estimativas de fitomassa; monitoramento da cobertura vegetal; queimadas, secas e inundações; sedimentos em suspensão nos rios e estuários. Mais informações sobre os sensores da família Landsat são encontradas no Apêndice A.

2.3. Geoprocessamento e recursos naturais

Nas últimas décadas, o emprego de imagens de satélite vem se estabelecendo como um instrumento de fundamental importância nos estudos sobre o balanço de energia e de água, identificação de áreas em processo de degradação, desmatamento de reservas e monitoramento de rebanhos entre outros. As imagens de satélites passaram a representar uma das maneiras mais

adequadas de monitoramento ambiental, quer em escala local ou global. Enfim, este recurso permite obter resultados satisfatórios sobre análises em diversas áreas da ciência, em escala regional, sobretudo no ramo da agricultura.

Gomes (2000) procurou avaliar a vulnerabilidade de perda de solo em regiões semi-áridas utilizando sensoriamento remoto e geoprocessamento em Parnamirim – PE. O referido autor observou que a metodologia se mostrou eficaz para obtenção de carta de vulnerabilidade à perda de solo, no que diz respeito aos conceitos, ferramentas, técnicas e aplicabilidade. Tais resultados mostram o potencial do uso de sensoriamento remoto nestes tipos de trabalho. Já Nóbrega et al. (2004) desenvolveram um trabalho que teve como objetivo avaliar a relação entre os componentes de estresse hídrico e o rendimento na cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), por meio de técnicas de sensoriamento remoto termal, tendo obtido resultados satisfatórios.

Pesquisadores em vários programas internacionais vêm estudando o uso potencial de dados de sensoriamento remoto, com o objetivo de obter informações precisas sobre as condições e processos da superfície terrestre. Os resultados desses estudos têm demonstrado que avaliações quantitativas dos processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera podem levar a um melhor entendimento das relações entre o crescimento vegetativo e o manejo de água, por exemplo. Informações mais detalhadas sobre a superfície da terra podem agora ser obtidas dentro de uma ampla faixa de resolução espacial (5-5000 m) e resolução temporal (0,5-24 dias). No entanto, mesmo que considerável progresso tenha sido alcançado nesses últimos 20 anos em pesquisas aplicadas, dados de sensoriamento remoto permanecem ainda subutilizados no manejo dos recursos hídricos (BASTIAANSEN & BOS, 1999).

A tarefa de proporcionar informação confiável e precisa a partir de pequenas áreas (nível de pequenas fazendas, por exemplo) para uma bacia hidrográfica completa, abrangendo milhões de hectares de terra irrigada, está longe de ser trivial. Medidas de sensoriamento orbital, contudo, podem proporcionar informação regular sobre as condições hidrológicas e agrícolas da superfície da terra para vastas áreas. A capacidade do sensoriamento remoto de identificar e monitorar o crescimento vegetativo e outros parâmetros biofísicos relacionados tem experimentado um grande avanço nos últimos 20 anos, apesar de vários casos ainda permanecerem sem solução. Revisões sobre aplicações do sensoriamento remoto no manejo de água na agricultura e hidrologia são apresentadas por Choudhury et al. (1994), Kustas & Norman (1996), Bastiaanssen et al. (1998) e Ray & Dadhwal (2001).

Neste contexto, a evapotranspiração torna-se um elemento da mais alta importância, pois sendo um dos principais componentes do ciclo hidrológico a sua estimativa com maior confiabilidade, possibilitará um melhor entendimento sobre o balanço de água, e

conseqüentemente um melhor planejamento da irrigação, principalmente em áreas com limitados recursos hídricos.

Informações de satélites foram empregadas por Chen et al. (2005) na elaboração de mapas de evapotranspiração de uma bacia hidrográfica localizada na região de Saskatchewan, Canadá. Os autores identificaram uma alta variabilidade espacial da evapotranspiração sobre a bacia estudada. O estudo evidenciou que a variabilidade da ET apresenta uma alta correlação com o tipo de cobertura vegetal, com o índice de área foliar e a classe de solo. Tal fato expressa que a evapotranspiração determinada de uma maneira pontual não deve ser estendida para uma escala regional.

Muitos são os métodos existentes para se estimar ou medir a evapotranspiração de uma determinada área. Alguns métodos baseiam-se em medições de campo, oriundas de equipamentos meteorológicos (ALLEN et al., 1998; DOOREMBOS & PRUITT, 1977); outros se fundamentam em modelos hidrológicos onde a evaporação e a transpiração são computadas como parte do ciclo hidrológico com variações temporais e espaciais. Mas recentemente, métodos baseados em sensoriamento remoto passaram a ser empregados por pesquisadores e técnicos na estimativa da evapotranspiração. Estes métodos se fundamentam nos processos biofísicos e no balanço de energia.

2.4. Balanço de energia

A energia solar origina-se no seu centro, onde os núcleos de átomos de hidrogênio submetidos a alta pressão fundem-se originando núcleos de hélio com liberação de energia para o meio. Na superfície do Sol, a temperatura é em torno de 6.000 K. A energia resultante desta reação é irradiada para o espaço e parte dela atinge a atmosfera terrestre com uma intensidade de cerca de 1.373 W.m^{-2} (ENERGIAS RENOVAVEIS, 2006). Esta energia chega à superfície terrestre, tendo sua intensidade decomposta ao longo do caminho devido às várias propriedades da luz, que, em contato com os corpos, pode ser absorvida, refletida ou transmitida, assim gerando um fluxo de calor. As nuvens, os gases da atmosfera, a superfície terrestre, espelhos d'água, coberturas vegetais, etc, são alguns desses corpos (AHRENS, 2005).

O saldo de radiação exerce um papel fundamental nos processos de troca de calor e massa na baixa troposfera, uma vez que se constitui no principal responsável pelo aquecimento do solo, do ar e, principalmente, pela evapotranspiração da vegetação nativa e das culturas. Para a determinação do saldo de radiação, especialmente em escala regional, faz-se necessário o

conhecimento do albedo, também muito importante em estudos de mudanças climáticas, desertificação, queimadas e meio ambiente em geral (SILVA et al., 2005).

Autores como Tasumi (2003), Paiva (2005) e Ataíde (2006) vêm mostrando que, por exemplo, a temperatura e a reflectância da superfície determinadas através de imagens de satélite nas regiões do espectro visível e infravermelho próximo, juntamente com dados meteorológicos obtidos na área de interesse, fornecem subsídio para o cálculo de três componentes do balanço de energia à superfície: saldo de radiação (R_n), fluxo de calor do solo (G) e fluxo de calor sensível (H), em diferentes escalas espacial e temporal. De posse destas informações, em condições não advectivas, pode-se estimar o fluxo de calor latente (λET), e conseqüentemente a evapotranspiração pela seguinte equação:

$$\lambda ET = R_n - G - H \dots\dots\dots(1)$$

onde: λET é o fluxo de calor latente instantâneo ($W.m^{-2}$); R_n o saldo de radiação ($W.m^{-2}$);

G o fluxo de calor no solo ($W.m^{-2}$) e H o fluxo de calor sensível ($W.m^{-2}$).

A rapidez na disponibilidade das informações de parâmetros climáticos pelos satélites vem contribuindo significativamente para se obter um melhor entendimento do clima e dos ecossistemas e se obter um gerenciamento com maior eficiência do suprimento hídrico e da produção agrícola. A radiação global derivada de observações do Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES-8) em combinação com medições meteorológicas “in loco” foram empregadas por Jacobs et al. (2002) na estimativa da evapotranspiração em áreas úmidas na região de Paynes Prairie Preserve, North Central Florida, USA. Os autores observaram que a evapotranspiração diária, oriunda das informações de satélite, apresentaram uma alta correlação ($r^2=0,90$) com os valores medidos na superfície.

O movimento dos fluxos globais de radiação que agem na atmosfera, pode ser visto na Figura 2.

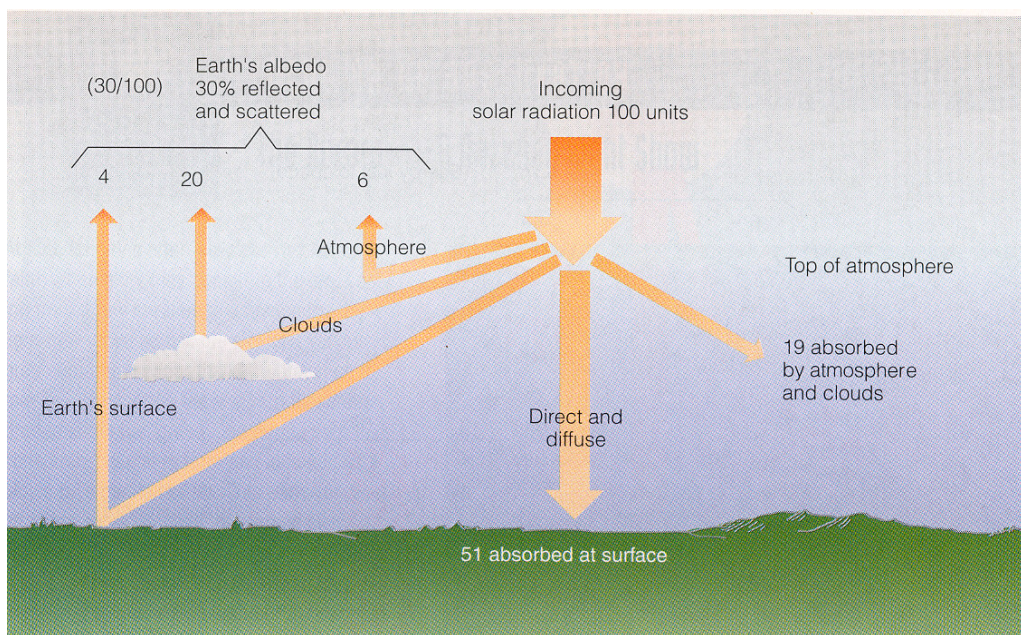


FIGURA 2: Fluxo de radiação com sua distribuição na atmosfera.

2.5. Evapotranspiração

A evapotranspiração pode ser definida como a quantidade de água evaporada e transpirada por uma superfície como algum grau de cobertura vegetal, durante determinado período. Isto inclui a evaporação da água do solo, a evaporação da água depositada pela irrigação, chuva ou orvalho na superfície das folhas e a transpiração vegetal. A evapotranspiração pode ser expressa em valores totais, médios ou diários, em volume por unidade de área ou em lâmina de água, no período considerado. É um processo que depende principalmente da quantidade de energia solar que chega a superfície do solo, visto que se trata de um processo com gasto de energia (BERNARDO et al., 2005).

O conhecimento das taxas de perdas de água por evapotranspiração nas zonas áridas do globo é de grande importância em decorrência da característica natural destes ecossistemas, que apresenta reduzida disponibilidade hídrica. Este problema se torna mais acentuado nas regiões áridas de clima quente que não possuem água de degelo e os seus rios são em quase sua totalidade intermitentes ou efêmeros. Nestas regiões, os rios são perenizados artificialmente por vazões controladas de açudes. Bezerra & Oliveira (1999) lembram que o manejo das irrigações deve atender às necessidades das culturas, de modo a permitir a manifestação de seu potencial produtivo. Assim, para um planejamento racional das irrigações é de fundamental importância o conhecimento da evapotranspiração da cultura durante os estádios de desenvolvimento.

As regiões áridas e semi-áridas do globo representam um dos mais extensos ambientes do globo terrestre, abrangendo em torno de 40% das terras do globo. Um fator impressionante nestes ecossistemas é a heterogeneidade natural da superfície. Muitos dos estudos sobre as relações solo-água-plantas nestes ecossistemas são desenvolvidos em micro-escalas espacial e temporal e em períodos curtos. Poucas são as informações existentes sobre radiação e componentes do balanço de energia em escala de bacia hidrográfica (Malek & Bingham, 1997).

Os referidos autores mostraram as relações entre a radiação global e os componentes de balanço de energia para a bacia Grande, localizada na parte norte do Estado de Nevada. A média anual do albedo foi de 24%, (sendo máximo na superfície coberta pela neve, 85%, e mínimo, 10%, para o solo molhado). Isto significa que 24% do saldo de radiação anual foi refletido para o espaço enquanto 32% foi perdido, também para o espaço, na forma de radiação de ondas longas. Os restantes 44%, representa o saldo de radiação, o qual será empregado nos processos de fluxo de calor latente e sensível. Os autores supra citados observaram que 85,3% e 14,6% do saldo anual da radiação foram usados no aquecimento do ar e na evapotranspiração, respectivamente.

Devido às elevadas taxas de perdas d'água para a atmosfera e ao fato da evapotranspiração ser um dos componentes mais importantes do Balanço Hídrico, a sua estimativa com melhor precisão e confiabilidade é essencial em estudos que envolvam programação de irrigação, planejamento e um melhor manejo de recursos hídricos armazenados nos reservatórios do semi-árido cearense. Várias são as equações, métodos e modelos desenvolvidos para estimar a evapotranspiração (ET), que por seu caráter empírico tem precisão variável. Alguns métodos a subestimam enquanto outros a superestimam, de modo que, calibrações e validações dos métodos são necessárias para se atingir uma estimativa da evapotranspiração com uma maior confiabilidade. A estas limitações, adicione-se o fato de que os métodos e equações empregados tratam de estimativas em uma escala local.

Na escolha de um método para a estimativa da evapotranspiração devem ser levados em consideração praticidade e precisão, pois, apesar de esses métodos teóricos e micrometeorológicos serem baseados em princípios físicos, apresentam limitações, principalmente quanto à instrumentação, o que pode restringir a sua utilização (BERLATO & MOLION, 1981).

Silveira (2000), em estudo de Análise de Componente Principal (ACP), envolvendo as bacias hidrográficas: Alto Jaguaribe, Médio Jaguaribe, Baixo Jaguaribe, Acaraú, Salgado, Banabuiú, Coreaú, Curu, Parnaíba, Metropolitana e Litoral, no estado do Ceará, concluiu que para cada uma delas existe um componente que influencia de maneira diferenciada a

evapotranspiração. Este fato nos remete a inferir que para cada região, dependendo de sua localização, topografia, vegetação, tipo de solo, etc, existe um limite na utilização de um método específico, ou seja, fica difícil a avaliação dos resultados obtidos através de uma generalização de determinado método de estimativa de evapotranspiração.

Assim sendo, a estimativa de evapotranspiração através de imagem de satélite também tem suas limitações, bastando para isso observar a grande área tomada para a obtenção deste parâmetro. No entanto, como a imagem de satélite é formada através do conjunto de dados captados por sensores imageadores, que analisam o comprimento de onda que é obtido pelo satélite, dependendo do tipo de superfície imageada, pode-se supor que este tipo de estimativa pode ser, sim, um grande avanço no processo de determinação de evapotranspiração para uma macrorregião e que o método do balanço de energia através do uso de imagem de satélite, pode ser uma boa opção.

Uma das vantagens da determinação da evapotranspiração através de imagens de satélite é a obtenção deste valor tomado pixel a pixel, ou seja, os valores de evapotranspiração poderão ser extrapolados para uma área maior ou até uma região, diferentemente do que ocorre com dados locais. Outra grande vantagem do emprego de imagens de satélites na estimativa da evapotranspiração em escala regional reside no fato de que, a água gasta no processo de evapotranspiração, pode ser obtida diretamente sem a necessidade de quantificar outros parâmetros hidrológicos de difíceis determinações, como a umidade por exemplo. Este fato é bem mais acentuado nas regiões secas do globo, seja pela falta de informações, seja pela peculiaridade dos ecossistemas presentes nestas áreas. Flerchinger & Cooley (2000) em estudos sobre o balanço hídrico em regiões semi-áridas montanhosas no estado de Idaho, USA, comentam as dificuldade de se estimar a evapotranspiração em escala regional. Os autores afirmam que esta limitação é decorrente da grande variabilidade espacial e temporal das precipitações, associados ao grande número de comunidades vegetais presentes nestas áreas.

Pesquisadores como Sobrino et al. (2005) comentam que métodos tradicionais de estimativa da evapotranspiração, como razão de Bowen, fornecem estimativas precisas sobre uma área homogênea, mas os resultados não se aplicam para grandes áreas com diferentes coberturas. Os referidos pesquisadores acreditam que um significativo avanço ocorrerá com o mapeamento da distribuição espacial da evapotranspiração pelo emprego do sensoriamento remoto.

Imagens geradas pelo NOAA-AVHRR e Landsat foram empregadas por Granger (2000) na estimativa da evapotranspiração em escala regional na bacia de Gediz, Turquia. Foram utilizadas duas imagens do verão de 1998. Parâmetros como temperatura do ar, déficit da

pressão de vapor e radiação líquida foram estimadas a partir das imagens e aplicadas a um modelo convencional para gerar dados diários. Os dados obtidos foram comparados com medidos em áreas agrícolas na região de Gediz. Os resultados mostraram que as taxas de evapotranspiração, tendo como base o sensoriamento remoto e os medidos, apresentaram valores variando entre 2,5 - 4,5 mm dia⁻¹.

2.6. SEBAL

O algoritmo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) foi desenvolvido em 1995 por Bastiaanssen (BASTIAANSSEN et al., 1998; BASTIAANSSEN, 2000) e validado em vários ecossistemas mundiais, como Egito, Espanha, Portugal, França, Itália, Argentina, China, Índia, Paquistão, Nigéria, Zâmbia, Etiópia, Estados Unidos, Novo México, etc. (TASUMI, 2003). O SEBAL é um algoritmo semi-empírico que promove a parametrização do balanço de energia e fluxos de superfície baseado em alguns dados locais e medições espectrais de satélites (WELIGEPOLAGE, 2005). É necessário que os canais visível, infravermelho próximo e infravermelho termal sejam tomados como dados de entrada para o processo.

De acordo com Bastiaanssen (2000), apesar do algoritmo SEBAL ser fundamentado em formulações empíricas, os resultados da validação do mesmo em experimentos de campo têm mostrado que o erro relativo na fração evaporativa foi de 20%, 10% e 1% nas escalas de 1, 5 km e 100 km, respectivamente. O autor supra citado espera que o SEBAL apresente melhores resultados em escala regional, como também em áreas com superfície heterogênea.

O SEBAL possui várias etapas sequenciais e somente para a obtenção do Balanço de Radiação são requeridas onze etapas (Figura 3), onde em cada uma delas é feito o cômputo de uma ou mais variáveis necessárias para a etapa seguinte. Esta seqüência deve ser seguida de maneira a minimizar todos os erros de cálculo.

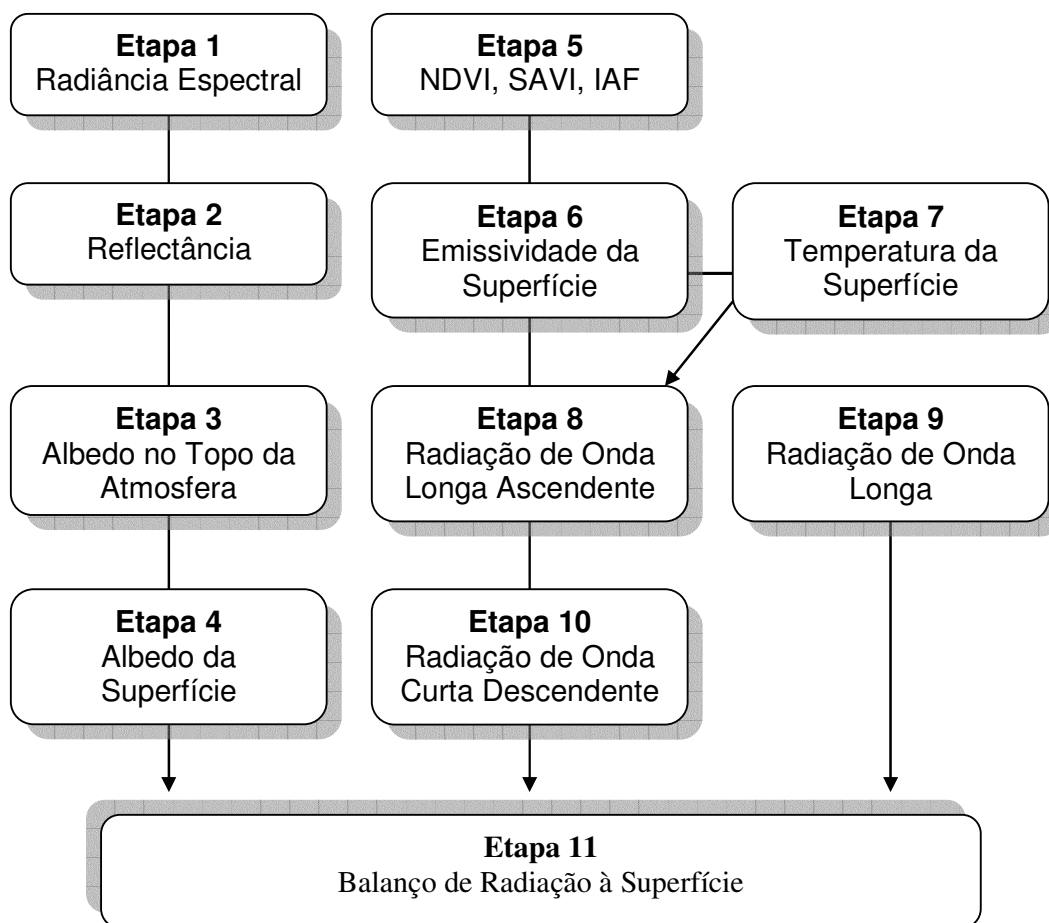


FIGURA 3: Fluxograma com as etapas de processamento do balanço de radiação à superfície

A combinação de imagens de satélite com o algoritmo SEBAL vem sendo empregada por diferentes autores na estimativa da evapotranspiração. Ayenew (2003) fez uso do algoritmo SEBAL para calcular a evaporação diária dos “Ethiopian rift lakes” e das áreas circunvizinhas. O autor observou que a estimativa da evaporação dos lagos ocorreu com uma confiança maior do que a evapotranspiração das áreas em redor, uma vez que os processos físicos envolvidos na evaporação da superfície líquida são mais fáceis de serem obtidos usando-se satélites, do que aqueles envolvidos na evapotranspiração da superfície heterogênea do solo. O autor afirma a importância do algoritmo SEBAL em estudos dos recursos hídricos em regiões que apresentam escassez ou ausência total de dados.

Kimura et al. (2007) comentam que o SEBAL vem sendo bastante testado em áreas irrigadas em diferentes partes do globo, porém poucas referências são encontradas quando se investiga a estimativa da evapotranspiração da vegetação nativa de regiões semi-áridas pelo emprego deste algoritmo. Os autores supra citados aplicaram e validaram o SEBAL na

estimativa da $ET_{diária}$ de vegetação nativa em bacia na região de Loess Plateau of China empregando procedimento descrito por Allen et al (1998) e Bastiaanssen (1998).

Os resultados obtidos mostraram uma taxa de evapotranspiração para as áreas de pastagens semelhantes as taxas registradas nas áreas irrigadas; enquanto que as áreas de agricultura de sequeira apresentaram taxas iguais às registradas nas áreas cobertas por arbustos de porte pequeno à médio. Nesta região, os valores da $ET_{diário}$ obtidos pelo algoritmo SEBAL foram ligeiramente melhor do que o da fração evaporativa.

Para identificar a eficácia de uso do recurso água na agricultura irrigada, Albari et al. (2007) avaliaram quatro sistemas de irrigação em áreas da bacia Zayandeh Rud, Esfahan, Iran. Neste estudo os sistemas foram avaliados como um todo, apesar de que apenas as informações sobre as dotações de água tenham sido empregadas. As imagens de satélite (NOAA) foram analisada pelo algoritmo SEBAL para estimar a evapotranspiração real, a potencial e a produção de biomassa. A avaliação de cada sistema foi definida pela produtividade da água, ou seja, produção de kg de biomassa por metros cúbicos evaporados. As produtividades mais elevadas, em torno de $0,72 \text{ kg.m}^{-3}$, foram registradas nos sistemas que tinham como fonte hídrica, águas superficiais.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Características da área de estudo

A bacia hidrográfica do Acaraú está localizada na porção norte do Estado do Ceará, abrangendo uma área total de 14.427 km², na qual estão inseridos os açudes Jaibaras, Paulo Sarasate, Forquilha e Edson Queiroz (Figuras 4 e 5).

Os açudes acima citados são os mais importantes da bacia, sendo assim fonte hídrica para os municípios circunvizinhos, bem como têm suas águas captadas para outras atividades, tais como irrigação, piscicultura e controle de cheias dos rios de suas bacias hidráulicas. Todos eles são administrados pelo DNOCS. O açude Paulo Sarasate (Araras Norte) possui o maior potencial de armazenamento, ocupando parte dos municípios de Varjota (maior parte), Pires Ferreira, Sta. Quitéria e Hidrolândia. O açude Forquilha é o mais antigo e o de menor porte (Tabela 2)

TABELA 2: Informações dos açudes de maior importância na bacia do Acaraú.

Açude	Município	Coordenadas (UTM*)		V/a ^{**} (m)	Capacidade (milhões de m ³)	Conclusão (ano)
		N	E			
Jaibaras	Sobral	9.580.522	333.157	8,10	104,4	1936
Paulo Sarasate	Varjota	9.534.638	339.071	9,50	891,0	1958
Edson Queiroz	Sta. Quitéria	9.534.029	381.372	9,42	250,5	1987
Forquilha	Forquilha	9.580.247	360.519	5,60	50,1	1921

Fonte: DNOCS (2006), SRH (2006).

* Datum WGS 84; Projeção UTM, Zona 24S

** Relação volume (V) área (a) do reservatório.

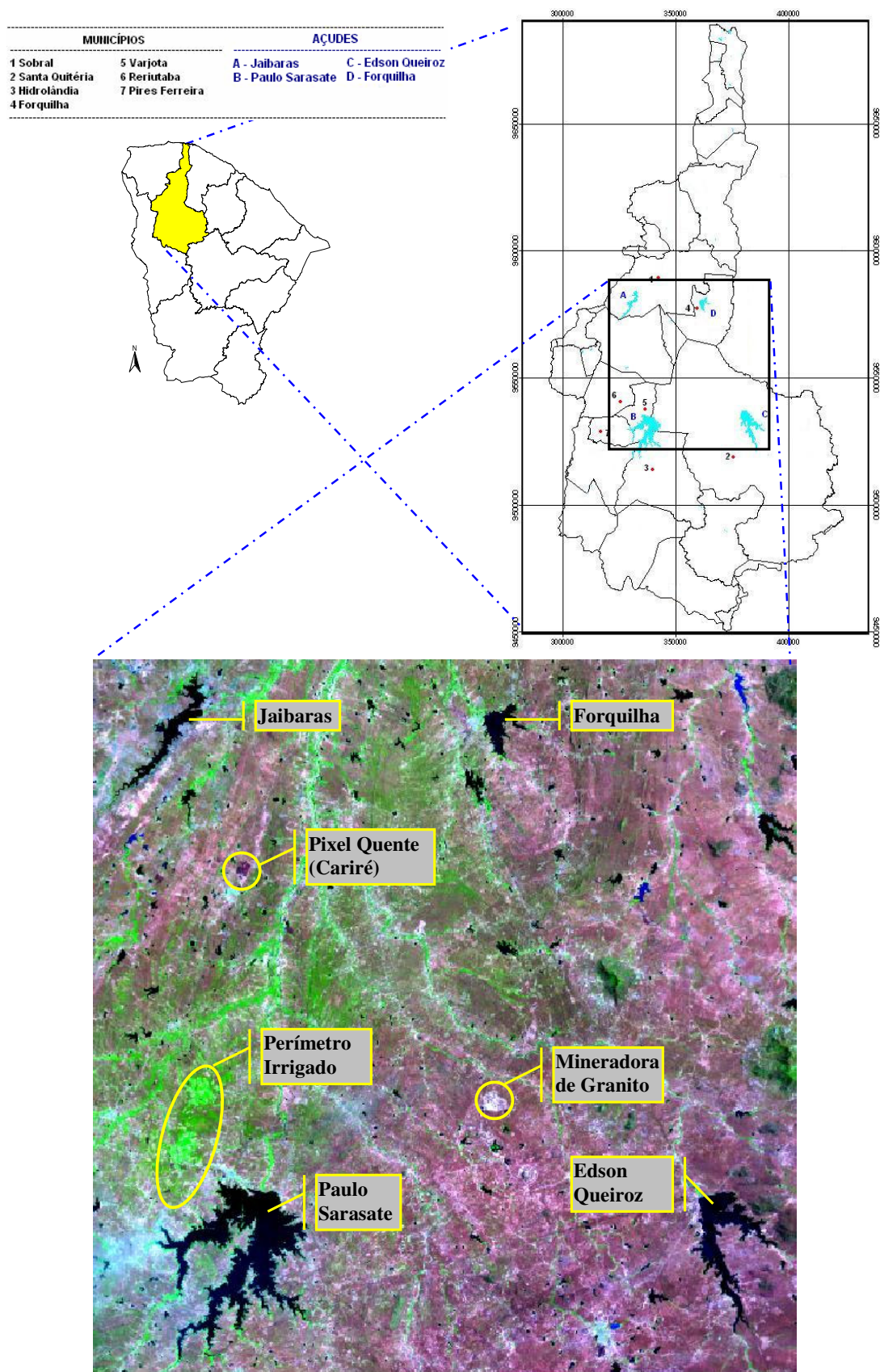


FIGURA 4: Localização da área de estudo na bacia do Acaraú.

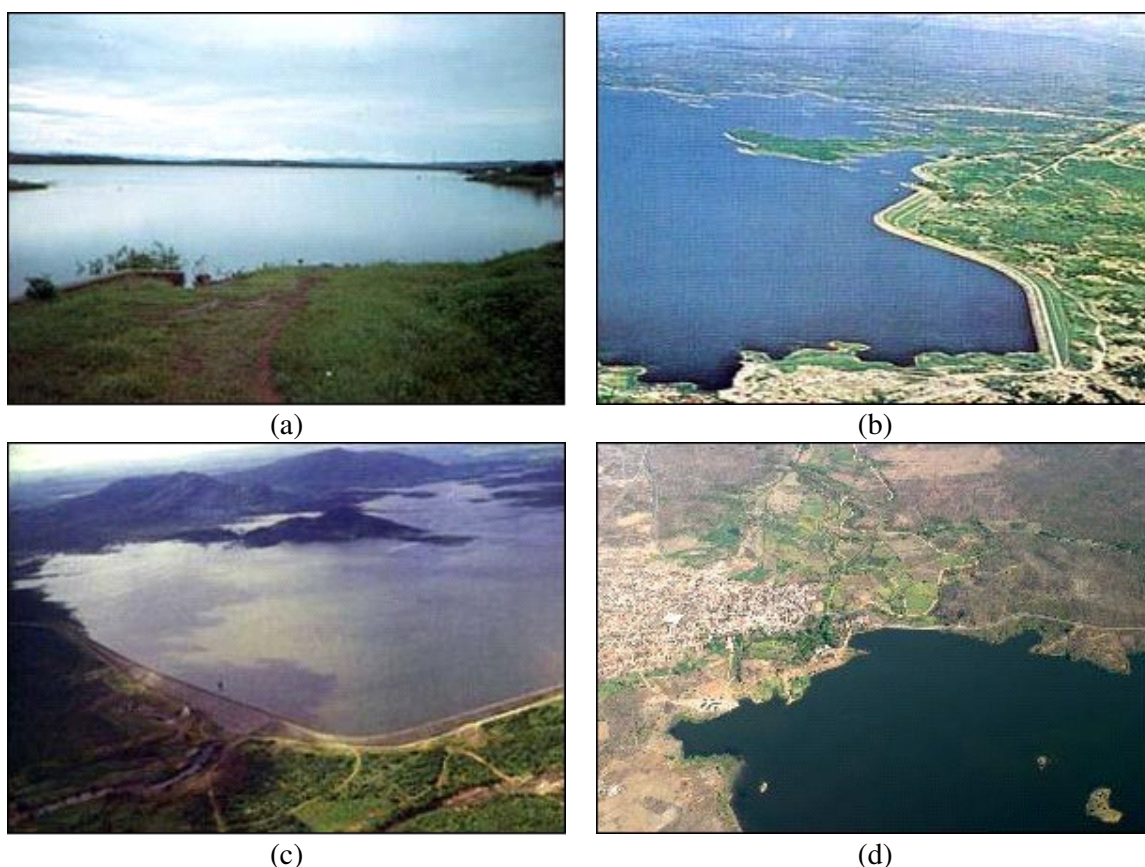
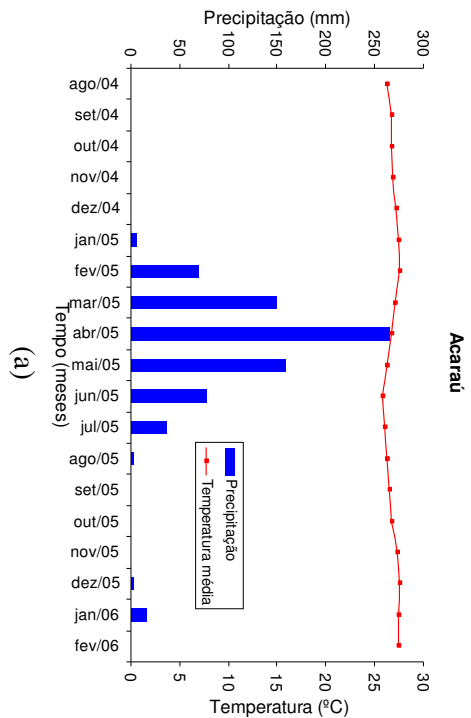
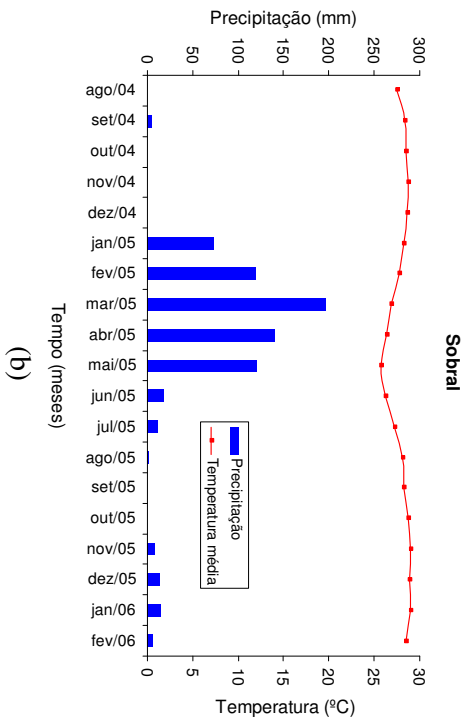
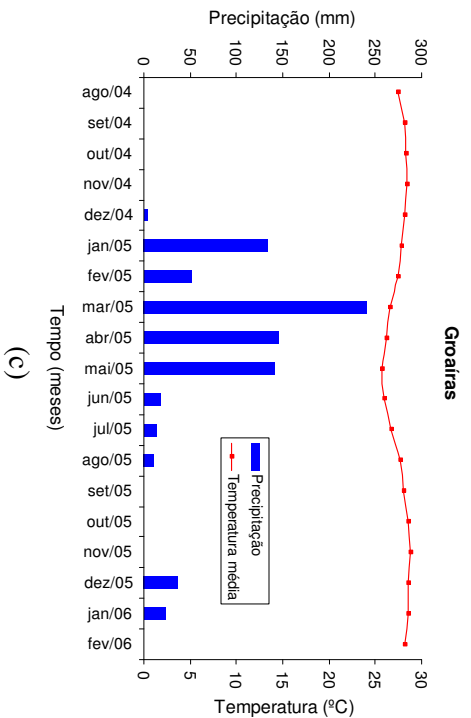
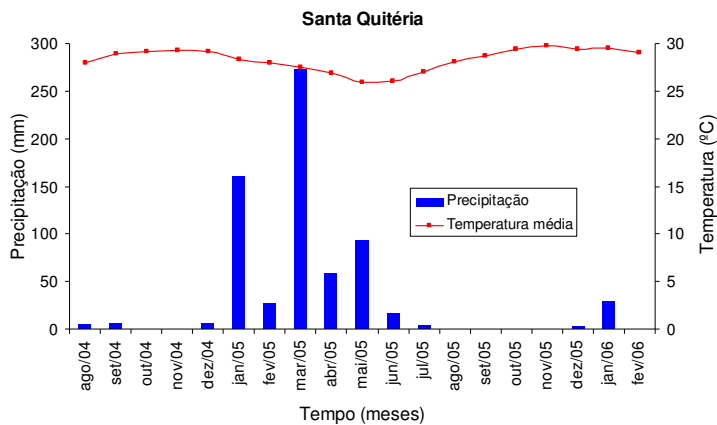


FIGURA 5: Açudes: Jaibaras (a), Paulo Sarasate (b), Edson Queiroz (c) e Forquilha (d).

Na bacia do Acaraú são observados dois tipos climáticos segundo a classificação de Köpen: BSw'h' (parte alta da bacia do Acaraú), semi-árido quente e úmido com chuvas de outono e Aw' (áreas próximas ao litoral), tropical chuvoso com chuvas máximas no outono.

O regime pluviométrico da bacia do Acaraú, como em todo o estado, se caracteriza por uma alta variabilidade espacial e temporal; portanto, o principal problema com relação à pluviometria na região é em decorrência muito mais na irregularidade do regime do que da altura pluviométrica anual. A Figura 6 apresenta as precipitações registradas em quatro estações inseridas na área de estudo





(d)

FIGURA 6: Precipitações registradas de agosto/2004 a fevereiro/2006 nos municípios de Acaraú (a), Sobral (b), Groaíras (c) e Sta Quitéria (d).

Na bacia do Acaraú, segundo o Mapa de Solos do Estado do Ceará (IPLANCE, 1992), ocorrem, predominantemente, quatro tipos de solo, (Figura 7). A nomenclatura das classes é apresentada abaixo segundo o novo sistema brasileiro de classificação de solos (Embrapa, 2006c) e, entre parênteses, a nomenclatura anterior.

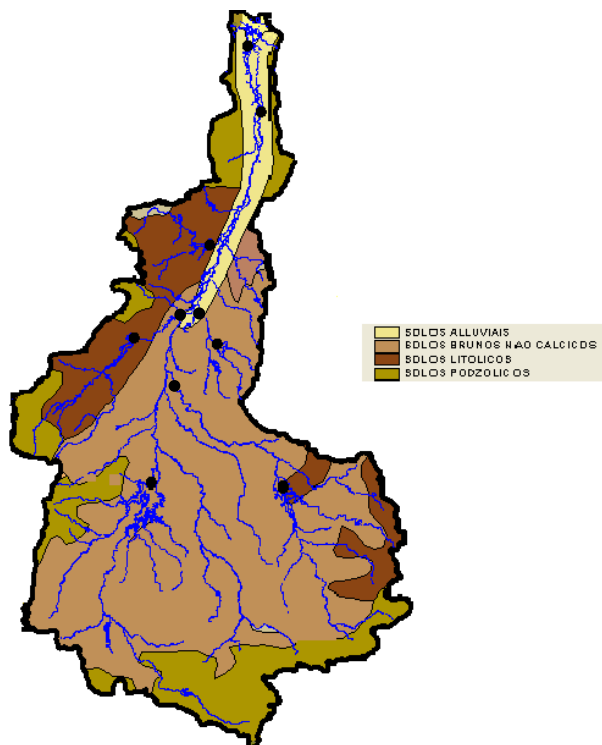


FIGURA 7: Mapa de solos da bacia do Acaraú

Argilossolo (Podzólico Vermelho-Amarelo) –São solos derivados de sedimentos argilo-arenosos do Terceário (Formação Barreiras). Podem ser observados, principalmente, na área litorânea e na parte mais ao sul da bacia do Acaraú.

Luvissolo (Bruno Não-Cálcico) –O material de origem é constituído, principalmente, dos gnaisses, granitos, quartzitos anfibolitos e migmatitos. Apresenta, freqüentemente, pedregosidade superficial e susceptibilidade à erosão, principalmente a do tipo laminar. Esta classe de solo recobre praticamente toda a parte alta e terço médio da bacia.

Neossolos Flúvicos (Aluviais) –São solos de alta fertilidade e de grande potencial agrícola, que ocorrem nas várzeas dos cursos d'água. O material originário é constituído por sedimentos fluviais não consolidados de natureza e granulometria variada. Este tipo de solo pode ser observado ao longo do rio Acaraú.

Neossolo Litólico (Litólico Eutrófico) – Integram esta classe solos pouco desenvolvidos, rasos a muito rasos, possuindo um horizonte A firmado diretamente sobre a rocha. A textura varia de arenosa, média a argilosa, com substrato composto por arenito, argilito, siltito, folhelhos, calcário e conglomerados (Grupo Jaibaras).

3.2. Dados empregados no trabalho

A imagem do Mapeador Temático (TM) do Landsat 5 foi adquirida junto à Divisão de Geração de Imagens (DGI) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), datada de 01/09/2004 (dia Juliano = 244) compreendendo a órbita/ponto 218/63, tendo seu horário de passagem registrado às 09 h e 45 min, horário local. A imagem é composta por sete bandas espectrais, cujas características estão representadas na tabela 3.

TABELA 3: Características espectrais e espaciais do sensor TM e suas aplicações.

Banda	Faixa Espectral (μm)	Região do Espectro	Resolução Espacial (m^2)	Principais Aplicações
1	0,45 – 0,52	Azul	30	Altamente absorvida por corpos d'água e sensível a pluma de fumaças oriundas de queimadas e atividades industriais
2	0,52 – 0,60	Verde	30	Altamente absorvida por corpos d'água, porém apresenta sensibilidade a sedimentos em suspensão
3	0,63 – 0,69	Vermelho	30	Apresenta bom contraste entre diferentes tipos de cobertura vegetal, permitindo diferenciação entre espécies e identificação de áreas agrícolas.
4	0,76 – 0,90	IV Próximo	30	Apresenta sensibilidade à rugosidade do dossel florestal. Permite o mapeamento de áreas de queimadas e áreas agrícolas.
5	1,55 – 1,75	IV Médio	30	Sensível ao teor de umidade da vegetação, sendo bastante útil no monitoramento de estresse hídricos de culturas.
6	10,4 – 12,5	IV Termal	120	Apresenta sensibilidade quanto aos fenômenos relativos aos contrastes térmicos, sendo usado para a determinação da temperatura da superfície.
7	2,08 – 2,35	IV Médio	30	Altamente sensível à morfologia de terrenos, permitindo obter informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia.

Fonte: Bezerra (2006)

Para manuseio e processos entre as bandas, recorte, classificação, realce e outras tarefas, fez-se necessário a utilização do software Erdas IMAGINE 8.5 versão Demo, apropriado para este tipo de trabalho.

Os primeiros procedimentos para se trabalhar com as imagens (empilhamento) estão descritos no Apêndice B.

Para suporte e base para alguns cálculos metodológicos no Erdas IMAGINE 8.5, fizeram-se necessários dados tabulares da plataforma de coleta de dados meteorológicos automatizados (PCD's) dos municípios de Sobral, Santa Quitéria, Acaraú e Groaíras, que foram adquiridas junto à Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). Nestes dados, são apresentados valores de variáveis como direção e velocidade do vento, precipitação, pressão, temperatura, umidade do ar e radiação global para o município de Sobral.

Na Tabela 4, estão apresentados os períodos tomados para os dados, levando em consideração o município representativo dos PCD's e a área em estudo.

TABELA 4: Informações dos municípios e período de coleta dos dados.

Município	UTM*		Período de Dados
	N	E	
Sobral	9.592.124	350.726	22/04/2003 - 03/02/2006
Groaíras	9.566.703	346.193	18/08/2004 - 08/02/2006
Santa Quitéria	9.521.604	371.714	17/08/2004 - 09/02/2006
Acaraú	9.680.649	375.825	24/08/2004 - 08/02/2006

* Datum WGS 84; Projeção UTM, Zona 24S

3.3. O algoritmo SEBAL

Uma vez disponibilizados os dados referentes à imagem, procedeu-se com os passos descritos a seguir, para obtenção do balanço de radiação utilizando a ferramenta Model Maker do Software Erdas IMAGINE 8.5.

- Etapa 1 - Calibração Radiométrica (carta de $L_{\lambda i}$)

A radiância espectral de cada banda ($L_{\lambda i}$) é o início efetivo do cálculo do balanço de radiação e consiste em conversão do Número Digital (ND) de cada pixel da imagem em radiância espectral monocromática. Para as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, essas radiâncias representam a energia solar refletida por cada pixel, por unidade de área, de tempo, de ângulo sólido e de comprimento de onda. Já para a banda 6, segundo a equação de Markham & Baker (1987), representa a energia emitida por cada pixel. A radiância monocromática de cada uma das sete bandas é obtida segundo a expressão:

$$L_{\lambda i} = L_{min_i} + \frac{(L_{máx_i} - L_{min_i})}{Q_{máx} - Q_{min}} \times ND \dots\dots\dots (2)$$

A equação 2 pode ser substituída pela equação 2a, uma vez que na descrição do produto (imagem) não estão claramente explícitos os valores $Q_{máx}$ e Q_{min} , sendo considerada essa diferença como 255 e também, adotou-se os valores de “a” e “b” da Tabela 4.

$$L_{\lambda i} = a_i + \frac{b_i - a_i}{255} \times ND \dots\dots\dots (2a)$$

onde: $L_{\lambda i}$ é a radiância espectral de cada banda ($W.m^{-2}st^{-1}\mu m^{-1}$); a_i o coeficiente de calibração (radiância mínima) de cada banda ($W.m^{-2}st^{-1}\mu m^{-1}$); b_i o coeficiente de calibração (radiância

máxima) de cada banda ($\text{W.m}^{-2} \text{st}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$); i são as bandas (1, 2, ..., 7) do Landsat 5 e ND é o número digital de cada pixel na imagem.

TABELA 5: Descrição das bandas TM do Landsat 5, com intervalos de comprimento de onda, coeficientes de calibração (mínima [a] e máxima [b]) e irradiância espectral no topo da atmosfera (TOA)

Descrição dos Canais	Comprimento de onda (μm)	Coeficientes de Calibração ($\text{W.m}^{-2}\text{st}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$)		TOA, $k\lambda(k_{\lambda i})$ ($\text{W.m}^{-2}\mu\text{m}$)
		a	b	
Banda 1 (azul)	0,45 - 0,52	-1,52	193	1.957
Banda 2 (verde)	0,53 - 0,61	-2,84	365	1.826
Banda 3 (vermelho)	0,62 - 0,69	-1,17	264	1.554
Banda 4 (infravermelho próximo)	0,78 - 0,90	-1,51	221	1.036
Banda 5 (infravermelho médio)	1,57 - 1,78	-0,37	30,2	215
Banda 6 (infravermelho temal)	10,4 - 12,5	1,2378	15,303	-
Banda 7 (infravermelho médio)	2,10 - 2,35	-0,15	16,5	80,67

Fonte: Chander & Markhan (2003)

- Etapa 2 – Reflectância (carta de $\rho_{\lambda i}$)

A reflectância monocromática ($\rho_{\lambda i}$) mede a capacidade de um objeto de refletir a energia radiante e é definida como sendo uma relação entre o fluxo de radiação refletida e o fluxo de radiação incidente, ou seja:

$$\rho_{\lambda i} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda i}}{k_{\lambda i} \cdot \cos Z \cdot d_r} \dots\dots\dots (3)$$

onde: $L_{\lambda i}$: radiância espectral de cada banda ($\text{W.m}^{-2} \text{st}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$); $k_{\lambda i}$ é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera ($\text{W.m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$, TABELA 4); Z o ângulo zenital solar ($^\circ$) e d_r é o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol (r_0) e a distância Terra-Sol (r) em determinado dia do ano (DJ).

Este último parâmetro (d_r) é determinado, segundo TASUMI (2003), pela seguinte equação:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(DJ \frac{2\pi}{365}\right) \dots\dots\dots (4)$$

onde: $\left(DJ \frac{2\pi}{365}\right)$ está em radianos.

O ângulo zenital solar é obtido diretamente do cabeçalho da imagem e para o dia 01 de setembro de 2004 (DJ = 244) deduziu-se que $Z = 33^\circ 18'$.

- Etapa 3 - Albedo no topo da atmosfera (carta de α_{toa})

O albedo planetário (α_{toa}) representa o albedo não corrigido de cada pixel na imagem e é obtida pela combinação linear das reflectâncias monocromáticas, qual seja:

$$\alpha_{toa} = 0,293\rho_1 + 0,274\rho_2 + 0,233\rho_3 + 0,157\rho_4 + 0,033\rho_5 + 0,011\rho_7 \dots\dots\dots (5)$$

onde: $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4, \rho_5$ e ρ_7 são as reflectâncias monocromáticas das bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, respectivamente.

- Etapa 4 - Albedo da superfície (carta de α)

Considerando-se que a atmosfera terrestre produz interferência na radiação solar e na radiação refletida, o albedo calculado no topo da atmosfera carece de correções devidas aos processos de absorção e espalhamento. Essas correções podem ser obtidas pela equação abaixo.

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_p}{\tau_{sw}^2} \dots\dots\dots (6)$$

onde: α_{toa} : albedo no topo da atmosfera; α_p é a radiação solar refletida pela atmosfera que varia de 0,025 a 0,04, mas para o SEBAL, o valor tomado foi 0,03 (Bastiaanssen, 2000); τ_{sw} a transmissividade atmosférica.

A transmissividade atmosférica (τ_{sw}), em condições de céu claro, pode ser obtida pela seguinte equação (Allen et al., 2002):

$$\tau_{sw} = 0,75 + 2 \times 10^{-5} z \dots\dots\dots (7)$$

onde: z : altitude de cada pixel;

Para as condições de nossa área de estudo, adotou-se uma altitude (z) igual a 70 m, para cálculo da transmissividade atmosférica (τ_{sw}) Bastiaanssen (1995), Morse et al.(2001), Allen et al. (2002) e Silva et al. (2002) fizeram uso da referida equação em seus trabalhos.

- Etapa 5 - Índices de vegetação (cartas de NDVI, SAVI e IAF)

Existem vários índices de vegetação; porém, os mais utilizados são: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI) e o Índice de Área Foliar (IAF).

O NDVI é definido como sendo um indicativo da quantidade e condição da massa verde na superfície e é obtido, segundo Allen et al. (2002), pela equação:

$$NDVI = \frac{\rho_{iv} - \rho_v}{\rho_{iv} + \rho_v} \dots\dots\dots (8)$$

onde: ρ_{iv} : refletividade da banda 4 (infravermelho próximo) e ρ_v é a refletividade da banda 3 (vermelho);

Os valores do NDVI variam de -1 a +1; no entanto, em superfícies vegetadas esses valores sempre são positivos, indo de 0 a +1 e em nuvens e espelhos d'água, os valores são geralmente negativos.

Já o SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), é uma variação do NDVI, fazendo com que os efeitos do solo sejam amenizados e o NDVI ajustado. Essa modificação tem como objetivo principal uma maior correlação entre áreas que possuem vegetações compatíveis, sendo que Xavier (1998) constatou esta condição. O SAVI pode ser obtido pela seguinte equação:

$$SAVI = \frac{(1+L)(\rho_{iv} - \rho_v)}{(L + \rho_{iv} + \rho_v)} \dots\dots\dots (9)$$

onde: ρ_{iv} : refletividade da banda 4 (infravermelho próximo) ρ_v é a refletividade da banda 3 (vermelha) e L o fator de ajuste ao solo = 0,5.

O IAF é definido como sendo a razão entre a área foliar de toda a vegetação pela unidade de área ocupada por ela, sendo indicador da biomassa de cada pixel na imagem. É obtido pela equação empírica (10) obtida por Allen et al. (2002):

$$IAF = \frac{-\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \dots\dots\dots (10)$$

onde: IAF: índice de área foliar e o SAVI é o Soil Adjusted Vegetation Index.

- Etapa 6 – Emissividades (cartas de ϵ_{NB} e ϵ_0)

Emissividade de um corpo é definida como a razão entre a energia emitida pelo mesmo e a energia emitida por um corpo negro, ambos a uma mesma temperatura. No SEBAL, segundo Allen et al. (2002), as emissividades na faixa espectral da banda termal do Landsat 5 - TM - ϵ_{NB} e em todo domínio da radiação termal - ϵ_0 podem ser obtidas segundo expressões:

$$\epsilon_{NB} = 0,97 + 0,00331 \times IAF \dots\dots\dots (11)$$

$$\epsilon_0 = 0,95 + 0,01 \times IAF \dots\dots\dots (12)$$

onde: IAF é o índice de área foliar.

As equações acima são válidas para $NDVI > 0$ e $IAF < 3$. Para valores de $IAF \geq 3$, $\epsilon_{NB} = \epsilon_0 = 0,98$. Para $NDVI < 0$, $\epsilon_{NB} = 0,99$ e $\epsilon_0 = 0,985$ (Allen et al., 2002).

- Etapa 7 – Temperatura da superfície (carta de T_s)

A temperatura da superfície (T_s) é obtida com base na radiância espectral da banda termal ($L_{\lambda 6}$) e emissividade (ϵ_{NB}), obtida na etapa anterior. A expressão abaixo é usada para sua obtenção em Kelvin (K):

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\epsilon_{NB} K_1}{L_{\lambda 6}} + 1\right)} \dots\dots\dots (13)$$

onde: K_1 e K_2 : constantes de calibração da banda termal do Landsat 5 (Allen et al., 2002); $K_1 = 607,76 \text{ W.m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ e $K_2 = 1260,56 \text{ K}$.

- Etapa 8 – Radiação de onda longa emitida (carta de $R_{L\uparrow}$)

Este parâmetro pode ser obtido através da equação de Stefan-Boltzman como segue:

$$R_{L\uparrow} = \epsilon_o \cdot \sigma \cdot T^4 \dots\dots\dots (14)$$

onde: ϵ_o é a emissividade de cada pixel; σ a constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \text{ K}^{-4}$); T é a carta da temperatura (K).

- Etapa 9 – Radiação de onda curta incidente ($R_{s\downarrow}$)

A radiação de onda curta incidente foi considerada como sendo constante em toda a cena selecionada, e para condição de céu claro, Allen et al (2002) sugerem a seguinte expressão para a sua determinação:

$$R_{s\downarrow} = S \cdot \cos Z \cdot d_r \cdot \tau_{sw} \dots\dots\dots (15)$$

onde: S é a constante solar (1.367 W.m^{-2}); Z é o ângulo zenital solar; d_r e τ_{sw} já foram definidos anteriormente.

- Etapa 10 – Radiação de onda longa incidente ($R_{L\downarrow}$)

Assim como a radiação de onda curta incidente, a radiação de onda longa incidente também foi considerada constante para toda a cena estudada. Em seu cálculo, novamente fez-se uso da equação de Stefan-Boltzman qual seja:

$$R_{L\downarrow} = \epsilon_a \cdot \sigma \cdot T_a^4 \dots\dots\dots (16)$$

onde: ϵ_a é a emissividade atmosférica obtida por $\epsilon_a = 0,85(-\ln(\tau_{sw}))^{0,09}$; σ é a constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \text{ K}^{-4}$) e T_a a temperatura do ar (K).

- Etapa 11 – Saldo de radiação (carta de R_n)

O saldo de radiação à superfície é obtido utilizando a equação de balanço de radiação à superfície (Silva et al., 2005; Allen et al., 2002).

$$R_n = R_{s\downarrow} - \alpha R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_o) R_{L\downarrow} \dots\dots\dots (17)$$

onde: $R_{s\downarrow}$ é a radiação de onda curta incidente; α o albedo corrigido do pixel; $R_{L\downarrow}$ a radiação de onda longa emitida pela atmosfera; $R_{L\uparrow}$ a radiação de onda longa emitida pelo pixel; ϵ_o a emissividade do pixel.

Simplificando a expressão anterior, obtemos:

$$R_n = R_{s\downarrow}(1 - \alpha) - R_{L\uparrow} + \varepsilon_o \cdot R_{L\downarrow} \dots\dots\dots (17a)$$

- Etapa 12 – Fluxo de calor no solo (carta de G)

Bastiaanssen (2000) desenvolveu uma equação empírica, válida para o meio-dia, destinada ao cálculo do fluxo de calor no solo.

$$G = [T_s(0,0038 + 0,0074\alpha)(1 - 0,98NDVI^4)]R_n \dots\dots\dots (18)$$

onde T_s é a temperatura da superfície (°C); α o albedo corrigido do pixel; NDVI o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada e R_n o Saldo de Radiação.

Para a correção de valores do fluxo de calor no solo para NDVI <0, utilizou-se as seguintes expressões:

$$G = 0,3R_n \text{ (Silva \& Cândido, 2004)} \dots\dots\dots (19)$$

$$G = 0,5R_n \text{ (Allen et al., 2002)} \dots\dots\dots (20)$$

- Etapa 13 – Fluxo de calor sensível (carta de H)

O fluxo de calor sensível (H) é a parte mais importante do algoritmo SEBAL. No entanto, para obtê-lo, é necessário calcular antecipadamente alguns outros parâmetros, onde são necessários dados de estação meteorológica representativa da imagem, como a velocidade do vento (ms^{-1}) e a altura média da vegetação em torno da estação (adotado como igual a 0,3 m). É necessário também o conhecimento de dois pixels extremos da imagem, denominados pixel quente (hot pixel) e pixel frio (cold pixel). O primeiro, hot pixel, representa o pixel onde a temperatura se apresenta mais elevada (área degradada, por exemplo) e onde o fluxo de calor sensível é máximo. O cold pixel, contrariamente ao primeiro, representa o pixel, onde a temperatura é mais amena (espelho d'água, por exemplo), onde o fluxo de calor sensível (H) é igual à zero. A partir desses dois elementos, determina-se a variação de temperatura (dT) e a resistência aerodinâmica ao transporte de calor (r_{ah}).

Inicialmente, é preciso computar o coeficiente de rugosidade (z_{0m}) e a velocidade de fricção (u_*) na estação meteorológica. Para o cálculo do coeficiente de rugosidade local z_{0m} (m), utilizou-se a equação de Brutsaert (1982), conforme segue:

$$Z_{0m} = 0,12h \dots\dots\dots (21)$$

onde h é a altura da vegetação em torno da estação meteorológica.

Para o cálculo da velocidade de fricção u_* (ms^{-1}), usou-se a equação do perfil logaritmo do vento para a condição de estabilidade neutra, qual seja:

$$u_* = \frac{k \cdot u_x}{\ln\left(\frac{z_x}{z_{0m}}\right)} \dots\dots\dots (22)$$

onde k é a constante de Von Karman (0,41); u_x a velocidade do vento (ms^{-1}); z_x a altura em que foi tomado o valor da velocidade do vento e z_{0m} o coeficiente de rugosidade local.

Posteriormente, ainda assumindo a atmosfera em equilíbrio neutro e assumindo que os efeitos da rugosidade da superfície são desprezíveis, pode-se estimar a velocidade do vento a 100 m de altitude, altura esta chamada de *blending heigh*, segundo expressão:

$$u_{100} = u_* \frac{\ln\left(\frac{100}{z_{0m}}\right)}{k} \dots\dots\dots (23)$$

onde k já foi definido anteriormente; u_* a velocidade de fricção (ms^{-1}) e z_{0m} o coeficiente de rugosidade local (m).

Obtida a velocidade do vento a 100m (u_{100}), computou-se uma nova velocidade de fricção (u^*), para cada pixel, sendo computado anteriormente um novo coeficiente de rugosidade (Z_{0m}), desta vez para cada pixel, em função do SAVI, pela seguinte equação:

$$Z_{0m} = \exp(-5,809+5,62\text{SAVI}) \dots\dots\dots (24)$$

A velocidade de fricção (u^*), para cada pixel da imagem, é dada pela seguinte equação:

$$u_* = \frac{k \cdot u_{100}}{\ln\left(\frac{100}{z_{0m}}\right)} \dots\dots\dots (25)$$

onde u_{100} é a velocidade do vento (ms^{-1}) a 100 m; z_{0m} é a velocidade de fricção pixel a pixel e k já foi definido anteriormente.

A resistência aerodinâmica ao transporte de calor r_{ah} (sm^{-1}), ainda considerando a estabilidade neutra da atmosfera, pode ser computada inicialmente, para cada pixel, através da seguinte expressão:

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)}{u_* \cdot k} \dots\dots\dots (26)$$

onde z_1, z_2 : alturas acima da superfície (0,1 e 2 m respectivamente); u_* e k já foram definidos anteriormente.

A partir deste momento, pode-se iniciar o processo iterativo com o objetivo de calcular o verdadeiro valor de H , uma vez que este está sujeito às variações da condição inicial de cada pixel.

O processo iterativo inicia-se com o cômputo da diferença de temperatura próxima à superfície, dT ($^{\circ}\text{C}$), para cada pixel e é representado pela seguinte equação:

$$dT = a + bT_s \dots\dots\dots (27)$$

onde a, b são constantes de calibração da diferença de temperatura e T_s a temperatura da superfície ($^{\circ}\text{C}$).

Para a obtenção das variáveis “a” e “b”, partiu-se da seguinte situação. Para o pixel frio, o valor do fluxo de calor sensível (H) é nulo e o fluxo de calor latente (λET) é dado pela seguinte equação:

$$\lambda\text{ET}_{\text{frio}} = R_n - G \dots\dots\dots (28)$$

Para o pixel quente, o fluxo de calor latente (λET) é considerado nulo e o fluxo de calor sensível (H) é dado por:

$$H_{\text{quente}} = Rn - G = \frac{\rho \cdot c_p (a + bT_s)}{r_{ah}} \dots\dots\dots (29)$$

onde ρ é a densidade do ar ($1,15 \text{ kg m}^{-3}$); c_p o calor específico do ar ($1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$); a , b são constantes de calibração da diferença de temperatura; T_s a temperatura da superfície ($^{\circ}\text{C}$) e r_{ah} é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor sensível (sm^{-1}).

Assim, tem-se duas equações com duas incógnitas, o que possibilita a obtenção dos valores iniciais de “a” e “b”. Estes valores, em cada iteração, vão mudando até que se atinja uma condição de constância. A Figura 8 traz um exemplo de cálculo de “a” e “b”.

Por exemplo:

$$H_{\text{frio}} = 0 \Rightarrow a + bT_s = 0 \text{ (I)}$$

$$H_{\text{quente}} = Rn - G = \frac{\rho \cdot c_p (a + bT_s)}{r_{ah}} \Rightarrow a + bT_s = \frac{r_{ah}(Rn - G)}{\rho \cdot c_p} \text{ (II)}$$

Com o valor da temperatura para o pixel frio e os valores de r_{ah} , Rn , G e temperatura para o pixel quente, resolvemos a equação II, obtendo o seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} H_{\text{frio}} = a + b \cdot 22,0 = 0 \\ H_{\text{quente}} = a + b \cdot 40,5 = 13,93 \end{cases}$$

Resolvendo:

$$b = 13,93 / (40,5 - 22,00) = \mathbf{0,75}$$

$$a = -0,75 * 22,00 = \mathbf{-16,5}$$

FIGURA 8: Exemplo de cálculo de “a” e “b”, para cômputo de “dT”.

O valor inicial de H não é representativo, vez que foi obtido para uma condição atmosférica que geralmente não corresponde à realidade, servindo apenas como ponto de partida para o processo iterativo, onde em suas etapas subseqüentes, se considera a real condição de estabilidade de cada pixel. Devido aos efeitos turbulentos aquecerem a superfície e afetarem as condições atmosféricas e a resistência aerodinâmica, aplica-se a teoria da similaridade de Monin-Obukhov, obtendo-se o comprimento Monin-Obukhov (L) em metros, que é utilizado para identificar a condição de estabilidade da atmosfera e que é computado pela seguinte expressão:

$$L = - \frac{\rho \cdot c_p \cdot u_*^3 \cdot T_s}{kgH} \dots\dots\dots (30)$$

onde ρ , c_p , u_* , T_s e k já foram definidos anteriormente; g é o módulo do campo gravitacional terrestre ($9,81 \text{ ms}^{-2}$) e H o fluxo de calor sensível (W.m^{-2}).

Dependendo das condições atmosféricas, os valores das correções de estabilidade para o transporte de momentum (Ψ_m) e de calor (Ψ_h) deverão ser considerados. Estas variáveis irão auxiliar a nova modalidade de cálculo da velocidade de fricção (u_*) e da resistência aerodinâmica ao transporte de calor (r_{ah}), continuando o processo iterativo. Para isto, utilizam-se das seguintes fórmulas (Bastiaanssen, 1995, Morse et al., 2000; Allen et al., 2002; Bezerra, 2004; Feitosa, 2005):

I - Se $L < 0$ (condição de instabilidade):

$$x_{(0,1m)} = \left(1 - 16 \frac{0,1}{L}\right)^{0,25} \dots\dots\dots (31)$$

$$x_{(2m)} = \left(1 - 16 \frac{2}{L}\right)^{0,25} \dots\dots\dots (32)$$

$$x_{(100m)} = \left(1 - 16 \frac{100}{L}\right)^{0,25} \dots\dots\dots (33)$$

$$\psi_{h(0,1m)} = 2 \ln \left(\frac{1 + x_{(0,1m)}^2}{2} \right) \dots\dots\dots (34)$$

$$\psi_{h(2m)} = 2 \ln \left(\frac{1 + x_{(2m)}^2}{2} \right) \dots\dots\dots (35)$$

$$\psi_{m(100m)} = 2 \ln \left(\frac{1 + x_{(100m)}}{2} \right) + \ln \left(\frac{1 + x_{(100m)}^2}{2} \right) - 2 \arctg(x_{(100m)}) + 0,5\pi \dots\dots\dots (36)$$

II - Se $L > 0$ (condição de estabilidade):

$$\psi_{h(0,1m)} = -5 \left(\frac{0,1}{L} \right) \dots\dots\dots (37)$$

$$\psi_{h(2m)} = -5 \left(\frac{2}{L} \right) \dots\dots\dots (38)$$

$$\psi_{m(100m)} = -5 \left(\frac{100}{L} \right) \dots\dots\dots (39)$$

III - Se $L = 0$ (condição de neutralidade): $\Delta m = 0$ e $\Delta h = 0$

Após esse procedimento, obteve-se o valor da velocidade de fricção corrigida pela seguinte equação:

$$u_* = \frac{k \cdot u_{100}}{\ln \left(\frac{100}{z_{0m}} \right) - \psi_{m(100m)}} \dots\dots\dots (40)$$

Posteriormente, obteve-se o valor da resistência aerodinâmica corrigida ao transporte de calor (r_{ah}) pela seguinte equação:

$$r_{ah} = \frac{\ln \left(\frac{z_2}{z_1} \right) - \psi_{h(z_2)} + \psi_{h(z_1)}}{u_* \cdot k} \dots\dots\dots (41)$$

onde z_2 e z_1 valem 2 m e 0,1 m respectivamente e $\Psi_{h(z_2)}$ e $\Psi_{h(z_1)}$ são as condições de estabilidade para o transporte de calor sensível a 2,0 m e 0,1 m respectivamente.

Com esses dados, inicia-se uma nova iteração, conforme Figura 9, recalculando-se os valores de “a” e “b”, dT, H, L, Ψ_m , Ψ_h , u_* e r_{ah} , até que os valores de “a” e “b” se mostrem constantes.

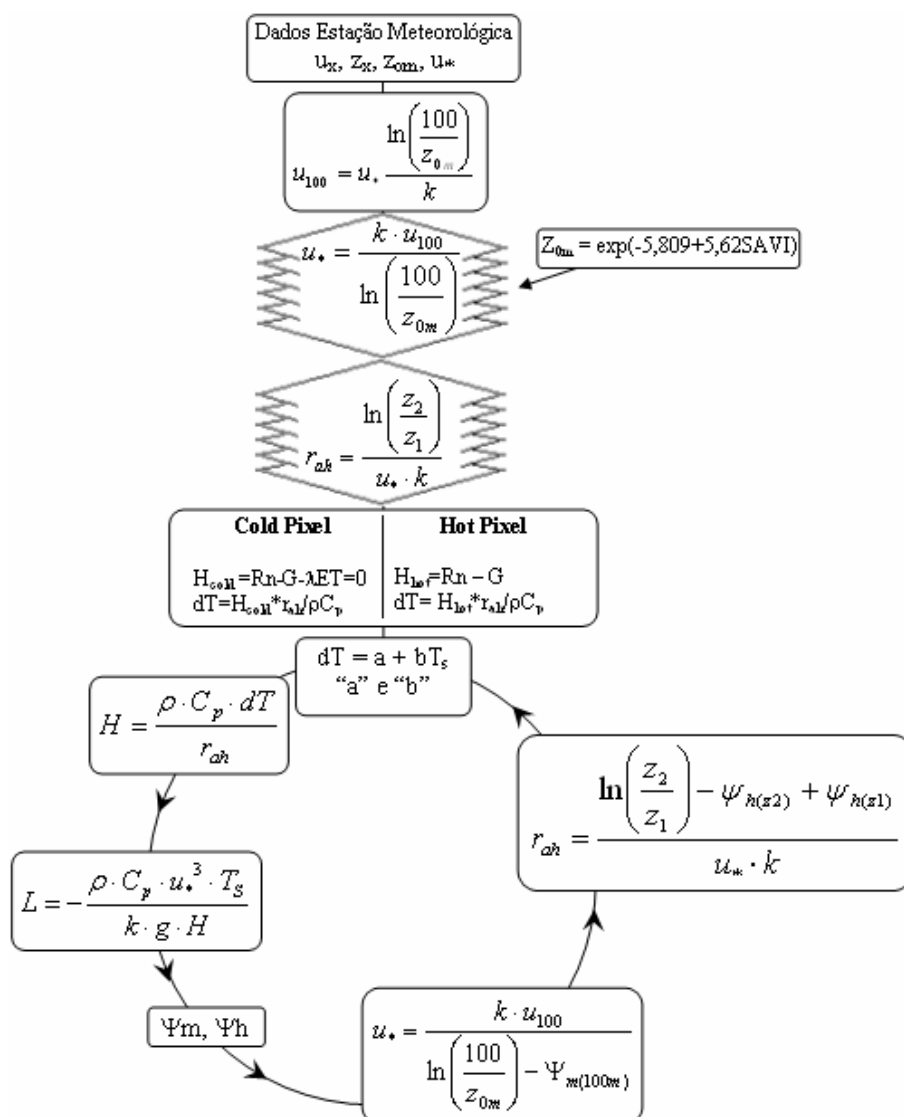


FIGURA 9: Fluxograma com as etapas da iteração para obtenção da carta de H.

- Etapa 14 – Fluxo de calor latente (carta de λET)

Com as cartas do saldo de radiação (R_n), fluxo de calor no solo (G) e fluxo de calor sensível (H), calculou-se a carta do fluxo de calor latente (λET), pela seguinte equação:

$$\lambda ET = R_n - G - H \dots \dots \dots (42)$$

3.4. Evapotranspiração diária (mm.dia⁻¹)

Para a obtenção da evapotranspiração diária, inicialmente obtém-se a evapotranspiração horária (ET_H), segundo a equação:

$$ET_H = \frac{\lambda ET}{L} \cdot 3600 \dots\dots\dots (43)$$

onde λET é o fluxo de calor latente e L o calor latente de vaporização da água ($2,45 \times 10^6 \text{ J.Kg}^{-1}$).

Posteriormente, obtém-se a fração da evapotranspiração de referência horária, que segundo Trezza (2002) é aproximadamente constante durante todo o dia e pode ser obtido pela seguinte equação:

$$FET_{0_H} = \frac{ET_H}{ET_{0_H}} \dots\dots\dots (44)$$

onde ET_H é a evapotranspiração horária e ET_{0_H} a evapotranspiração de referência horária.

Considerando que a fração de evapotranspiração de referência horária é igual à fração de evapotranspiração de referência de 24 horas, obtém-se a seguinte relação:

$$FET_{0_H} = FET_{0_{24}} = \frac{ET_H}{ET_{0_H}} = \frac{ET_{24}}{ET_{0_{24}}} \dots\dots\dots (45)$$

onde $FET_{0_{24}}$ é a fração de evapotranspiração de referência de 24 horas; ET_{24} a evapotranspiração real de 24 horas e $ET_{0_{24}}$ a evapotranspiração de referência em 24 horas.

Assim sendo, a evapotranspiração acumulada (24 horas) pode facilmente ser obtida através da seguinte equação (TREZZA, 2002):

$$ET_{24} = FET_{0_{24}} \cdot ET_{0_{24}} \dots\dots\dots (46)$$

onde $FET_{0_{24}}$ é a fração de evapotranspiração de referência em 24 horas e $ET_{0_{24}}$ a evapotranspiração de referência em 24 horas.

A evapotranspiração de referência diária (ET_{0_24}) e a evapotranspiração de referência horária (ET_{0_H}) foram obtidas pelo método da FAO - Penman-Monteith com dados do posto meteorológico da Funceme no município de Sobral-Ce. O valor da evapotranspiração de referência horária é válido para o horário de 9:00 h a 10:00 h (horário local), compreendendo o horário de passagem do satélite.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A quantificação da energia disponível a ser empregada no processo de evapotranspiração foi efetuada através da técnica de sensoriamento remoto, em condição de cobertura do céu próximo de zero no momento da passagem do satélite, Landsat 5, a qual processa-se às 9:45 h (hora local). Em seguida, apresentamos todas as etapas empregadas na estimativa da evapotranspiração no terço médio da bacia do Acaraú.

4.1. Elementos que compõem o Saldo de Radiação (R_n)

Para se conhecer o total de energia empregada no processo de evapotranspiração (calor latente) se faz necessário determinar o saldo de radiação (R_n) na superfície do solo. O total de energia que chega na superfície do solo (R_s) que pode ser empregada no processo de evapotranspiração depende do albedo da superfície e da liberação de energia do solo para atmosfera na forma de ondas longas.

4.1.1. Albedo (α)

O albedo da superfície do solo exerce um controle na quantidade de energia de ondas curtas absorvida pela superfície da terra, e, conseqüentemente, passa a ser um importante modulador do balanço de energia na superfície, influenciando os processos físicos-químicos que venham a ocorrer. A imagem com os valores instantâneos do albedo de superfície pode ser vista na Figura 10. A cor azul, identifica os corpos que refletem entre 3 e 10% da energia incidente sobre eles. Estes corpos representam os reservatórios hídricos, em quase sua totalidade, artificiais, os quais representam 3% da área estudada. Este percentual foi subestimado, visto que nuvens cobriram o maior reservatório da bacia do Acaraú, o açude Paulo Sarasate (Araras Norte), localizado no quadrante esquerdo inferior da imagem. A presença de nuvens é um dos fatores limitantes no emprego de imagens de satélites para determinar o balanço de radiação à superfície.

Em estudos realizados em áreas irrigadas (projeto Nilo Coelho) e parte da barragem de Sobradinho, município de Juazeiro da Bahia, Silva et al. (2005) encontraram valores de albedo entre 9 e 12% para os corpos d'água. Estes valores foram um pouco superiores ao encontrado neste estudo. Acredita-se que os menores valores registrados na bacia do Acaraú sejam

decorrentes da época em que a imagem foi captada (setembro). Esta época corresponde ao período seco da região, não havendo, portanto, aporte de água novas (presença de material inorgânico em suspensão) para os açudes, uma vez que os cursos que abastecem os reservatórios só apresentam fluxo durante a estação chuvosa (Mar-Jun). Moreira (2003) afirma que os minerais inorgânicos, oriundos das rochas e solos, que são carreados para os corpos d'água pelo processo da erosão eólica ou hídrica aumentam a reflectância da água, enquanto que a matéria orgânica diminui.

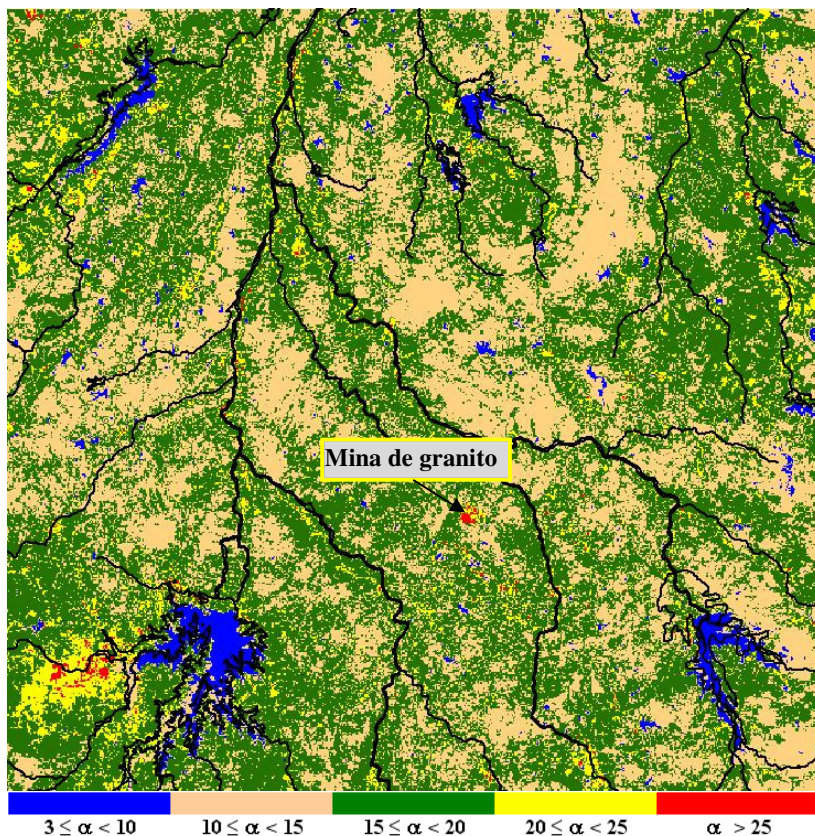


FIGURA 10: Mapa do albedo à superfície do solo no terço médio da bacia do Acaraú, Ceará.

Data: 01/09/2004

Em torno de 43% da área analisada apresentou albedo entre 10 e 15%, que representa áreas irrigadas e as regiões que apresentam uma vegetação nativa mais densa. Esta área apresentou um NDVI entre 0,3 e 0,5. Bezerra (2006), em estudo na região do Cariri cearense considerou um NDVI de 0,22 como representativo da mata nativa. Os pixels destacados de cor amarela apresentaram albedo entre 20 e 25% e foram registrados na área que se encontra sobre a ação de nuvens, solo sem cobertura vegetal e as areias expostas nos leitos dos rios. Os valores

de albedo encontrado para as nuvens confirmam os percentuais apresentados por Ahrens (2005) para nuvens de baixa espessura.

Fazendo um paralelo com a rede de drenagem da bacia podemos observar que uma considerável parte dos leitos dos cursos d'água se encontra representada por esta cor. Acredita-se que isto seja em decorrência dos leitos se encontrarem sem água, portanto, com areia exposta. Mesmo quando perenizado, artificialmente, as águas liberadas pelos reservatórios não são suficientes para promover um fluxo em toda a largura da calha do rio (Figura 11).



FIGURA 11: Rio Groaíras, afluente da margem esquerda do Acaraú, perenizado pelo açude Edson Queiroz, 2005.

Valores de albedo superiores a 25%, os quais são indicados pela cor vermelha representam parte da nuvem e pontos onde a rocha se encontra exposta ou então as mineradoras que exploram o granito na região. A região indicada na Figura 10, registrou um dos albedos mais altos da imagem (40%) a qual corresponde a uma mineradora de granito (Figura 12). Em geral, o albedo para o dia analisado (01/09/2005) apresentou valores superiores àqueles identificados por Loescher et al. (2005) em estudo de evapotranspiração e dinâmica da energia em regiões úmidas de floresta tropical na Costa Rica. Os referidos autores atribuíram estes valores baixos, a grande quantidade de água existente no solo.



FIGURA 12: Campo de mineradora de granito (361327,425; 9541768,518*), município de Santa Quitéria, 2007

4.1.2. Radiação de Onda Longa Emitida ($R_{L\uparrow}$)

A imagem da energia de onda longa instantânea liberada pelo solo $R_{L\uparrow}$ pode ser vista na Figura 13. Na referida imagem, as tonalidades azul e amarela representam as áreas com valores de fluxo de energia na forma de ondas longas inferiores a 400 W.m^{-2} , as quais se localizam na região que corresponde a maior concentração de nuvens. Pode-se observar que a intensidade de energia que varia de 400 a 450 W.m^{-2} (tonalidade verde) apresentou-se como uma extensão da região de abrangência das nuvens, bem como, representam as superfícies dos espelhos de águas dos reservatórios, as áreas circunvizinhas e zonas que apresentam uma maior densidade de plantas.

A cor ciano identificou uma grande extensão da área analisada (87% da superfície) com valores de ondas longas liberadas pela superfície do solo variando de 450 a 500 W.m^{-2} . Acredita-se que este alto percentual seja em decorrência de que nesta área os solos são predominantemente classificados em duas classes, Luvisolos e Neossolo Litólico. Valores de $R_{L\uparrow}$ superiores a 500 W.m^{-2} (tonalidade vermelho) foram registrados em uma pequena área (0,12% do total). Acredita-se que sejam áreas onde a rocha matriz, cristalino, se encontra totalmente exposta (Figura 19).

* Datum WGS 84; Projeção UTM, Zona 24S

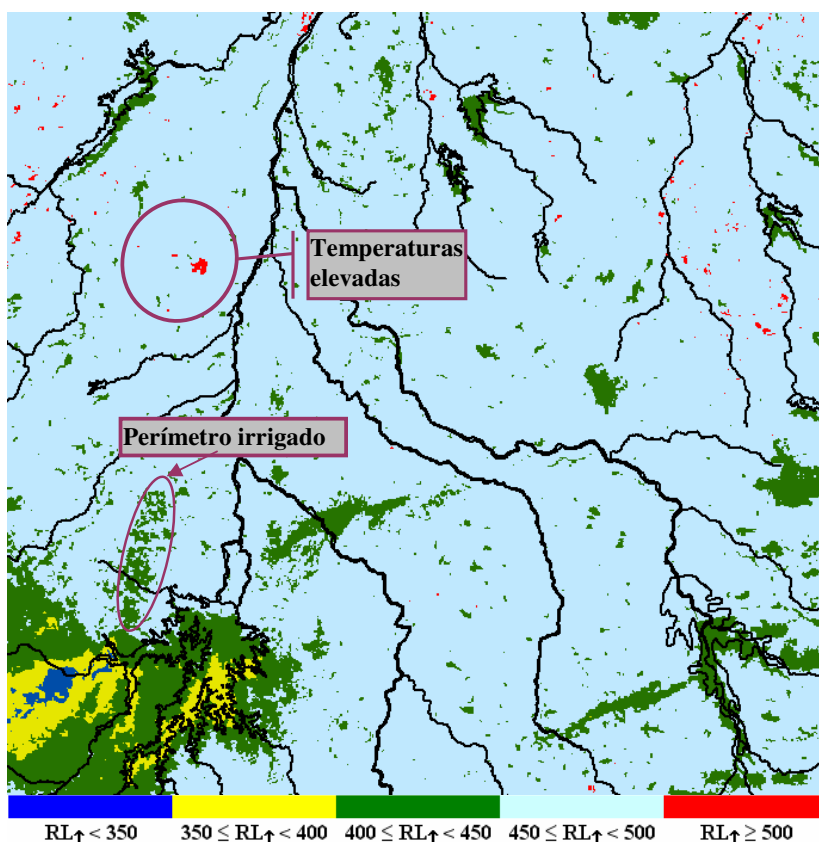


FIGURA 13: Mapa de radiação de ondas longas (W.m^{-2}) liberada pela superfície no terço médio da bacia do Acaraú, Ceará. Data: 01/09/2004.

4.1.3. Saldo de Radiação (R_n)

A imagem gerada pelo algoritmo SEBAL com os valores instantâneos do saldo de radiação à superfície (R_n) é apresentada na Figura 14. Os pixels nas cores amarelo e verde representam as áreas da superfície com valores de R_n variando de 350 a 450 W.m^{-2} e de 450 a 550 W.m^{-2} , respectivamente. Os pixels com menor R_n correspondem aos que apresentaram maiores albedos (Figura 10). Autores como Jury et al., (1991); Ahrens, (2005) e Nair et al. (2005) discutem que baixos valores do saldo de radiação expressam valores elevados de albedo ou da radiação de ondas longas liberadas pela superfície, os quais apresentam estreita relação com a umidade do ar e as propriedades físicas da superfície.

As áreas com menores valores de R_n foram enquadradas como aquelas que apresentam o solo exposto com a rocha matriz aflorando, bem como áreas com uma cobertura vegetação de baixa densidade, uma vez que na época em que a imagem foi registrada, 01/09/2004 (dia Juliano = 244), as espécies que compõem a caatinga encontram-se sem folhas,

podendo ser confundidas com o solo nu. Resultados semelhantes foram observados por Sousa (2006) na elaboração de mapas de uso da terra pelo emprego de imagens do CBERS na região sul do Estado do Piauí.

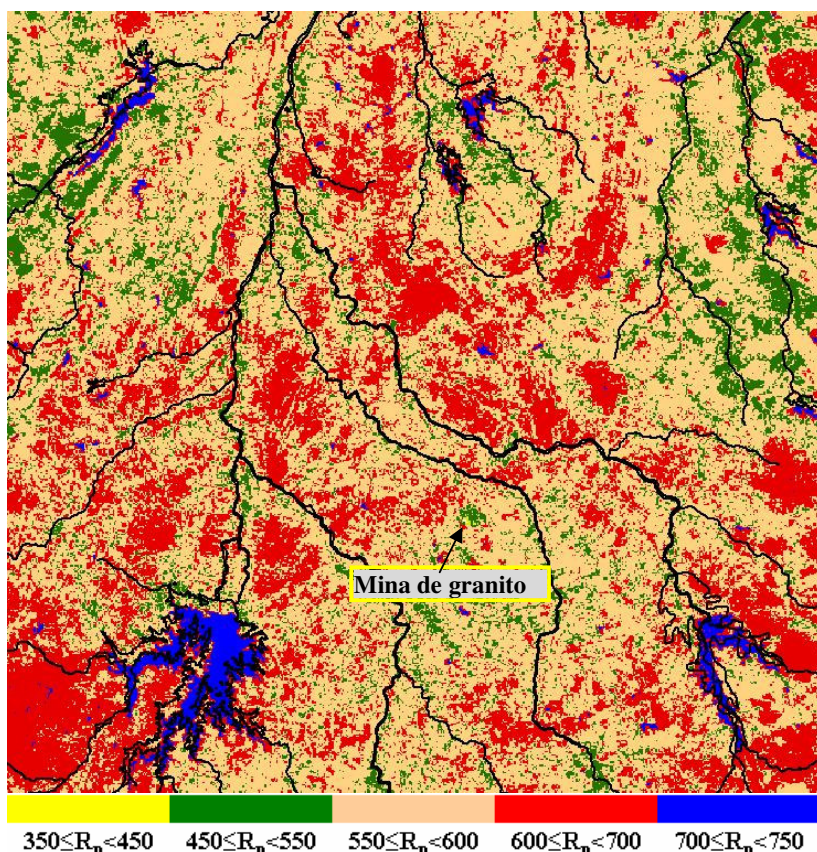


FIGURA 14: Mapa do saldo de radiação à superfície do solo ($W.m^{-2}$) no terço médio da bacia do Acaraú, Ceará. Data: 01/09/2004.

As regiões representadas pela cor bege ($550 W.m^{-2}$ a $600 W.m^{-2}$) expressam áreas de cobertura vegetal intermediária ($0,2 < NDVI < 0,3$). Acredita-se que se trata de áreas com uma floresta da caatinga mais intensa e que ainda não sofreram uma maior ação antrópica ou composta por espécies que apresentam uma maior resistência à abscisão foliar. Em estudos sobre balanço de radiação nos municípios de Petrolina - PE e Juazeiro - BA, Silva et al. (2005) encontraram o saldo de radiação (R_n) para a caatinga de $620 W.m^{-2}$.

Os pixels de cor vermelha (600 a $700 W.m^{-2}$), expressam as áreas utilizadas na prática de agricultura irrigada (Perímetro Araras Norte, Perímetro São Vicente, áreas privadas irrigadas); a vegetação distribuída nas proximidades dos reservatórios e aquelas que se desenvolvem ao longo dos trechos de rios perenizados artificialmente. São zonas que apresentaram albedo em variando de 10 a 15% e NDVI variando de 0,4 a 0,5. Jardim-Lima &

Walker Nelson (2003) consideraram o valor de 0,54 para o NDVI, como o valor limitante para indicação de áreas com floresta. A tonalidade azul marinho identifica as áreas que apresentam valores de R_n superiores a 700 W.m^{-2} . Pela imagem, Figura 14, pode-se observar que estas intensidades de energia são encontradas nos espelhos d'água dos reservatórios existentes na bacia do Acaraú. Silva et al. (2005) encontraram valores de R_n em torno de 750 W.m^{-2} para o lago de Sobradinho na Bahia, confirmando os resultados aqui encontrados.

A variabilidade de R_n sobre a área analisada pode ser vista na Figura 15, ficando evidente que a região apresenta uma baixa variabilidade espacial do saldo de radiação na superfície do solo, uma vez que 85% de todos os pixels da carta de R_n apresentam valores entre 550 e 700 W.m^{-2} e menos de 13% apresenta um saldo de radiação inferior a 550 W.m^{-2} .

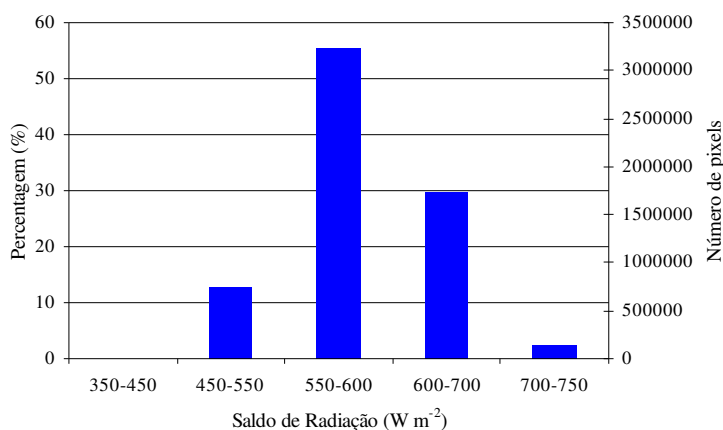


FIGURA 15: Histograma de frequência do saldo de radiação para o dia 01/09/2004

Os atributos estatísticos para os fatores determinantes do saldo de radiação da imagem analisada são apresentados na Tabela 6. Através dos dados pode-se observar a diferença existente entre os valores da média aritmética e da ponderada para alguns parâmetros. Tal fato nos mostra o cuidado que devemos tomar quando trabalhamos com valores médios. No caso de valores distribuídos por pixels é mais adequado o emprego da média ponderada, uma vez que o número de pixels com a mesma temperatura em relação ao número total passa a atribuir um peso ao parâmetro em análise.

TABELA 6: Estatística descritiva dos componentes do saldo de radiação na superfície para o terço médio da bacia do Acaraú. Data: 01/09/2004

Estatística	R_n (W.m⁻²)	α	R_{L↑} (W.m⁻²)	Temp. (°C)	R_{s↓} (W.m⁻²)	R_{L↓} (W.m⁻²)
Média	440,90	0,23	410,20	30,15	845,79	361,09
Média ponderada	591,00	0,15	466,23	31,42		
Mediana	440,90	0,23	411,75	30,18	845,79	361,09
Moda ^(*)	601,57	0,15	93,96	31,86	845,79	361,09
Desvio Padrão	173,65	0,12	66,60	6,37	-	-
Intervalo	598,93	0,43	427,62	20,56	0	0
Mínimo	143,07	0,02	93,96	19,87	845,79	361,09
Máximo	742,00	0,46	521,59	40,43	845,79	361,09

(*) existem múltiplas moda, sendo apresentada a de menor valor.

4.2. Fluxo de calor no solo (G)

Pesquisadores como Feitosa (2005) e Bastiaanssen et al. (1998) comentam que entre os componentes do Balanço de Energia, o fluxo de calor no solo (G) é o que apresenta maior dificuldade em se obter dados precisos, quando estimado através da técnica de sensoriamento remoto. Por outro lado, o último autor supra citado, não considera esse fato como um fator limitante quando se trabalha em escala de bacia hidrográfica; pois as medidas de G são representativas em áreas muito pequenas, quando o solo e a cobertura vegetal passam a ser considerados homogêneos.

A Figura 16 ilustra o fluxo de calor no solo determinado pelo algoritmo SEBAL. As áreas identificadas pela tonalidade azul escuro representam os valores de G superiores a 200 W.m⁻², os quais correspondem aos espelhos d'água dos açudes de grande, médio e pequeno porte presentes na parte média da bacia do Acaraú. A energia usada no aquecimento dessas águas corresponde a 30% do saldo de radiação. Esta maior energia registrada nos corpos d'água pode ser explicado pelo alto calor específico da água e conseqüentemente, uma maior capacidade de armazenamento de energia (DINGMAN, 1994). O fluxo de calor do solo que varia de 100 a 200 W.m⁻² corresponde aos pixels identificados pela cor vermelha os quais se encontram sobre manchas de solos classificados como Neolosso Litólicos (Litólico Eutrófico) (Figura 7).

Esta classe é composta por solos pouco desenvolvidos, rasos a muito rasos, possuindo um horizonte A firmado diretamente sobre a rocha. A textura varia de arenosa, média a argilosa, com substrato composto por arenito, argilito, siltito, folhelhos, calcário e conglomerados (Grupo

Jaibaras). Este tipo de solo se faz presente no terço médio da bacia, sendo encontrado na parte oeste e na divisa leste da bacia do Acaraú com a Metropolitana.

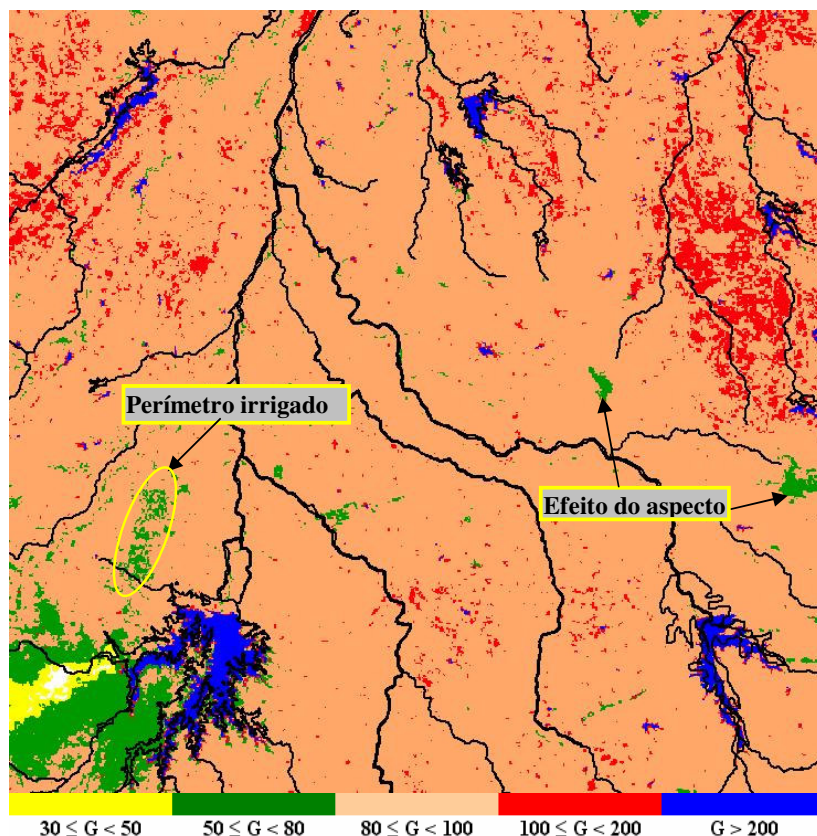


FIGURA 16: Cena do fluxo de calor do solo (W.m^{-2}) para o dia 01/09/2004.

A cor salmão, expressa um fluxo de energia que varia de 80 a 100 W.m^{-2} o qual foi identificado em 88% da área total. Pode-se observar que as áreas com este fluxo de energia apresentam uma continuidade formando um grande agrupamento sobre a área estudada. Esta área corresponde a mancha de solo da classe Luvisolo (Bruno não Cálcico) que cobre, praticamente, todo o terço médio e superior da bacia do Acaraú (Figura 7).

Estes solos se caracterizam por serem rasos e com baixa capacidade de armazenamento de água, o que contribui para uma redução do fluxo de calor no solo, passando a haver uma predominância de energia na forma de calor sensível. O material de origem é constituído, principalmente, dos gnaisses, granitos, quartzitos anfibolitos e migmatitos. Apresenta, freqüentemente, pedregosidade superficial e susceptibilidade à erosão, principalmente a do tipo laminar, (EMBRAPA, 2006c). O NDVI registrado para a área variou de 0,2 a 0,4 o qual corresponde a uma vegetação nativa de densidade baixa à intermediária. Em estudo sobre

previsão da área de plantio com culturas de verão, Ippoliti-Ramilo (1999) encontrou um NDVI variando de 0,2 a 0,4 para áreas de pastagens.

Os pixels com fluxo de energia no solo variando de 50 a 80 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ são identificados pela cor verde. Eles representam as áreas irrigadas, as regiões cobertas por uma vegetação mais densa e as áreas das vertentes de morros que se encontram à sombra no momento de passagem do satélite (aspecto da topografia). A interpretação dessa tonalidade é dificultada pela presença de nuvens, as quais apresentam um fluxo de calor nesta intensidade. No quadrante esquerdo inferior as áreas irrigadas do Projeto de Irrigação Araras Norte se confunde com as nuvens, impossibilitando uma interpretação com maior acurácia.

A Figura 17 mostra a distribuição dos valores do fluxo de energia no solo no dia 01/09/2005 (DJ = 244). Fica clara a baixa variabilidade espacial do fluxo de calor no solo, ou seja, 94% dos valores de G se encontram entre 50 e 100 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. Isto indica uma grande área com características semelhantes no concerne o tipo de solo, umidade do solo e a cobertura vegetal. Jury (1991) afirma que a intensidade do G apresenta uma forte relação com as propriedades físicas e químicas do solo, uma vez que os processos de transferência de energia (condução e convecção) no solo dependem da porosidade, teor de água e profundidade, entre outras características.

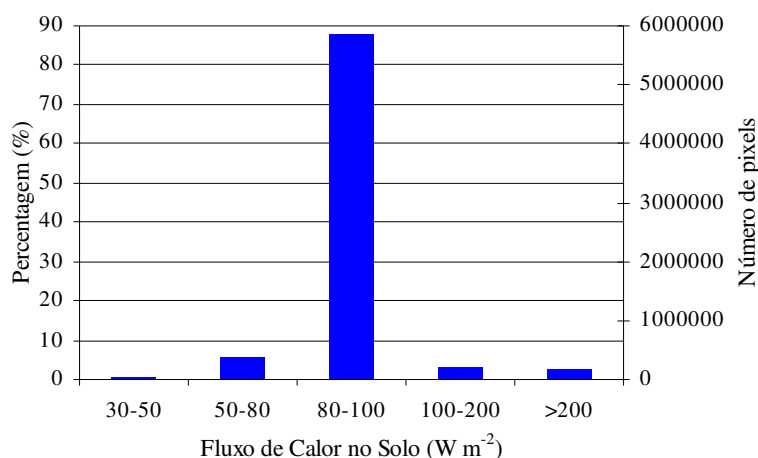


FIGURA 17: Histograma de frequência do fluxo de energia no solo (G) para o dia 01/09/2004

4.3. Calor Sensível (H)

O calor sensível da área em estudo foi calculado pelo emprego do algoritmo SEBAL, tendo-se com base a seleção de dois pixels âncoras, o “quente” e o “frio”, conforme a metodologia desenvolvida por Bastiaanssen (1998), a qual vem sendo largamente empregada na estimativa de evapotranspiração pelo emprego de sensoriamento remoto (AYENEW, 2003;

TASUMI, 2003; SILVA, 2005; WELIGEPOLAGE, 2005 e BEZERRA, 2006). Os pixels âncoras devem ser selecionados em áreas que expressem as condições extremas da cena. Para representar essas condições, o pixel quente deve ser selecionado em uma área que não apresente cobertura vegetal e, se possível, a rocha mãe se encontre exposta. Já o pixel frio deve ser selecionado em uma área que apresente uma alta densidade vegetal e, se possível, sem déficit hídrico. As características dos pixels nas condições extremas estão presentes na Tabela 7.

Tomando-se como base os valores extremos da imagem, pixels âncoras, determinou-se os coeficientes da relação linear da diferença de temperatura do ar para $z = 70$ m, empregando-se o processo iterativo descrito no capítulo – Material e Métodos. Os valores das diferenças de temperatura (dT) foram determinadas para toda cena, convergindo após nove iterações. A equação resultante foi:

$$dT = -8,6 + 0,38T_s \text{ (}^\circ\text{C)} \dots\dots\dots (43)$$

TABELA 7: Valores dos parâmetros que identificam as condições extremas, pixels âncora, da imagem no dia 244 do calendário Juliano. Data: 01/09/2004.

Parâmetros	Pixel quente	Pixel frio
E*	337902,97	373862,28
N*	9564712,66	9563352,35
T (K)	313,51	295,28
T (°C)	40,36	22,13
NDVI	0,153	-0,134
SAVI	0,069	-0,031
IAF	-0,057	0,000
Albedo (α)	0,131	0,059
$R_{s\downarrow}$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)		845,788
$R_{L\downarrow}$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)		361,090
$R_{L\uparrow}$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	520,055	424,565
R_n ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	557,794	727,064
G ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	107,286	218,119

* Datum WGS 84; Projeção UTM, Zona 24S

A carta que representa o calor sensível da cena estudada no momento da passagem do satélite pode ser vista Figura 18. Pode-se observar que os valores de $H < 60 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ foram registrados nos corpos d'água e áreas cobertas por nuvens (extremo do quadrante esquerdo inferior) e pequenas áreas próximo ao açude Edson Queiroz e a montante do açude Paulo Sarasate. O calor sensível registrado nos corpos hídricos pode ser explicado pelas propriedades físicas e químicas da água (calor específico, alcalinidade, salinidade, etc). Ayenew (2003)

comenta da relação existente entre alcalinidade, calor sensível e taxa de evaporação das superfícies líquidas. O referido autor observou que as águas com maior alcalinidade apresentaram uma maior temperatura e uma maior taxa de evaporação. De acordo com Mesquita (2004) as águas da bacia do Acaraú apresentam pH em torno de 7,40 apresentando, portanto, padrão de neutralidade.

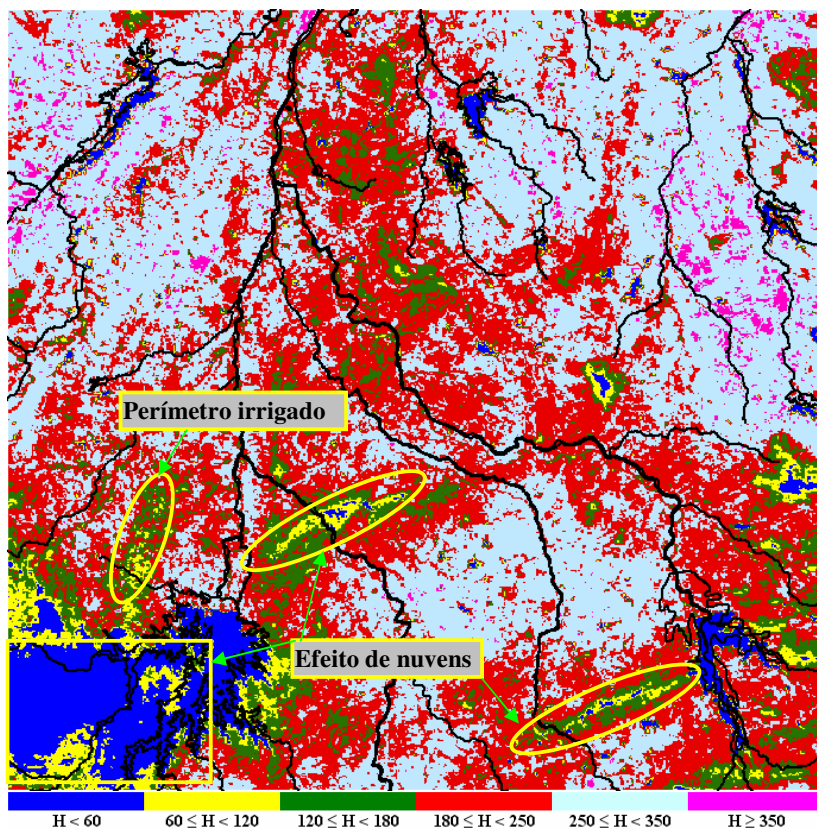


FIGURA 18: Imagem do calor sensível (W.m^{-2}) para o dia 01/09/2004.

A energia na forma de calor sensível maior que 350 W.m^{-2} é identificada pela cor lilás, os quais se encontram distribuídos em áreas isoladas na imagem. O NDVI correspondente a estas áreas foi inferior a 0,2; segundo Ippoliti-Ramilo (1999), este valor, identifica solo isento de cobertura vegetal. O pixel “quente” – temperatura de $40,16^\circ\text{C}$, do recorte da imagem em estudo está representado por esta tonalidade. Em viagem de campo, pôde-se observar que se trata de uma área com solo raso (presença alta de quartzo e mica) encontrando-se totalmente exposto (Figura 19). O número de pixels que apresenta valores de H superiores a 350 W.m^{-2} correspondem a menos de 1% da área total.

O maior valor de H registrado na imagem, no momento da passagem do satélite foi de 456 W.m^{-2} . Este valor confirma o observado por Bezerra (2006) na região do Cariri, Ceará,

onde foi identificado um fluxo de calor sensível máximo em torno de 470 W.m^{-2} . Ainda pela Figura 18, pode-se observar que mais de um terço (38%) da área esta representada pela tonalidade ciano, a qual identifica as áreas em que o fluxo de calor sensível varia entre 250 e 350 W.m^{-2} . Os pixels identificados por este padrão de cor apresentam-se em regiões bem definidas formando agrupamentos, podendo tal fato ser indicativo de uma semelhança do padrão da cobertura vegetal e solo. Esta hipótese se apóia na classificação dos solos da bacia, onde o terço médio e superior, em quase sua totalidade apresentam a mesma classe de solo, Luvisolo (Bruno não Cálxico) (IPLANCE,1997). Estes solos, quanto a origem, são constituídos, principalmente, dos gnaisses, granitos, quartzitos anfibolitos e migmatitos com pedregosidade superficial.



FIGURA 19: Imagem da área considerada como o pixel quente.

As áreas com H entre 60 e 120 W.m^{-2} são identificadas pela tonalidade amarelo ouro, enquanto que as áreas identificadas pela cor verde escuro representam os pixels com valores variando de 120 à 180 W.m^{-2} . Observa-se que as áreas com valores de H entre 60 e 120 W.m^{-2} (amarelo-ouro), encontram-se, sempre próximo daquelas onde fluxo de calor sensível varia entre 120 e 180 W.m^{-2} . Nestes intervalos vamos encontrar as áreas exploradas com a agricultura irrigada, as que estão recebendo influência do aspecto da topografia e as que expressam o efeito das nuvens. A presença de nuvens dificulta e até limita a interpretação das imagens de satélite. Em estudos de evapotranspiração de lagos nas áreas elevadas da Etiópia pelo emprego de imagens de satélite e o algoritmo SEBAL, Ayenew (2003) deparou-se com limitações na interpretação da imagem por decorrência da presença de nuvens sobre o lago Ziway.

Da área total, 40% apresenta um valor de calor sensível (H) variando de 180 a 250 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, sendo identificada na imagem pela cor vermelha. Analisando-se a malha de drenagem do rio Acaraú, observa-se que estas áreas concentram-se em torno dos dois maiores açudes a ao longo dos dois rios, sendo eles, o Groaíras, perenizado pelo açude Edson Queiroz e o Acaraú, perenizado pelo açude Paulo Sarasate. Observa-se, também, uma maior concentração destas áreas à margem direita do rio Acaraú. A distribuição de freqüência do fluxo de calor sensível é apresentada na Figura 20.

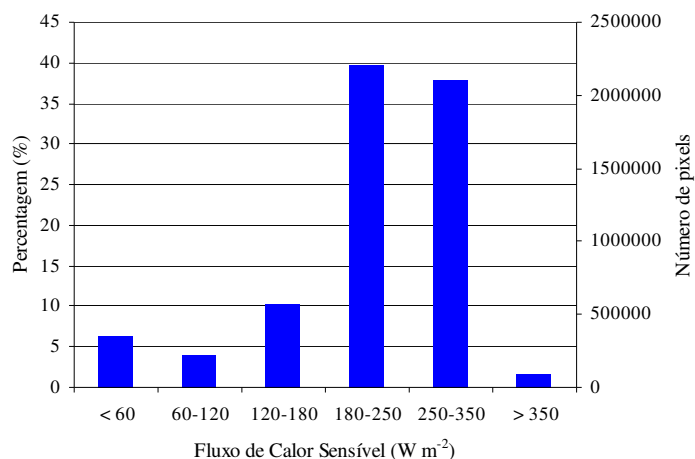


FIGURA 20: Histograma de freqüência do calor sensível (H) para o dia 01/09/2004.

4.4. Calor Latente (λET)

A fração da energia do R_n empregado no processo de evaporação das superfícies e da transpiração dos seres vivos é expressa pelo fluxo de calor latente (λET). O conhecimento do fluxo de calor latente é de fundamentação primária, uma vez que a evapotranspiração é um dos processos que compõem o ciclo hidrológico, sendo largamente empregada em estudos hidrológicos das bacias hidrográficas (FLERCHINGER & COOLEY, 2000; JACOBS et al. 2002). A evapotranspiração é o ponto inicial para se efetuar a gestão dos recursos hídricos e se definir o manejo da irrigação (BEZERRA & OLIVEIRA, 1999). A Figura 21 representa a imagem do fluxo de calor latente definida pelo emprego do algoritmo SEBAL.

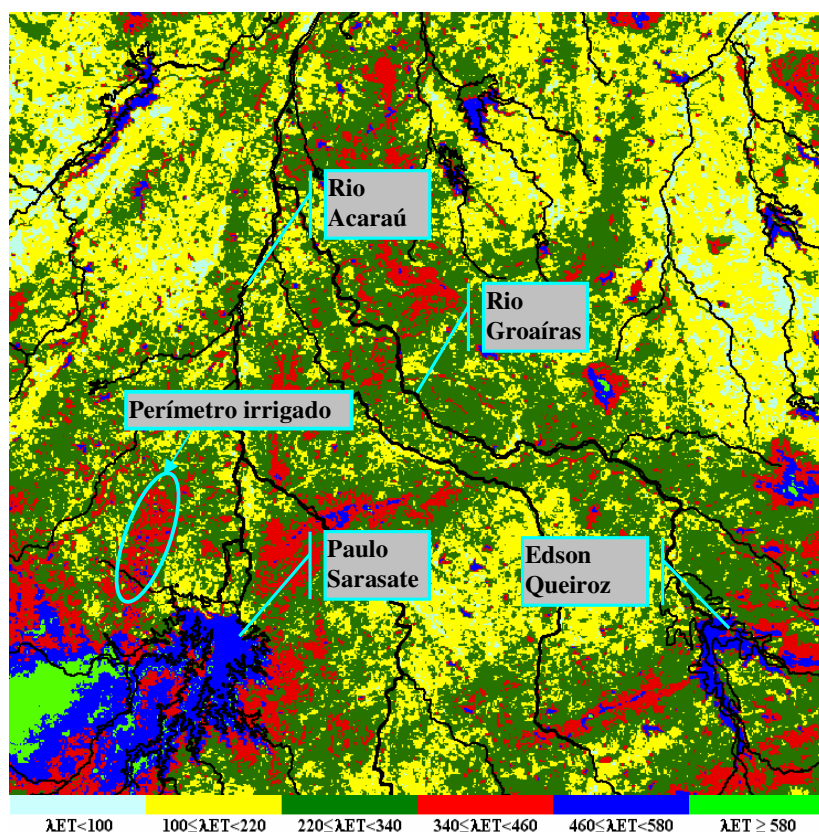


FIGURA 21: Imagem do fluxo de calor latente ($W.m^{-2}$) para o dia 01/09/2004.

Na referida figura as áreas na cor ciano expressam os valores de λET menores que $100 W.m^{-2}$. Estes valores são encontrados em quase 7% da área e representam, provavelmente, as áreas com pouca ou nenhuma cobertura vegetativa, onde o cristalino se encontra exposto. A exposição da rocha cristalina direciona a energia incidente a ser dissipada na forma de ondas longas para a atmosfera e/ou fluxo de calor sensível. Tal fato resulta em um baixo percentual do R_n expresso como fluxo de calor latente.

Os pixels de cor amarela representam valores do fluxo de calor latente entre 100 e $220 W.m^{-2}$, enquanto que as áreas de tonalidade verde escuro identificam os valores de λET que variam de 220 a $340 W.m^{-2}$. As áreas identificadas pelas tonalidades amarela e verde correspondem a 79% da imagem estudada, nos conduzindo a aceitar a hipótese de que este intervalo é representativo da vegetação nativa (caatinga arbustiva e arbóreas). Sendo o amarelo o identificador de uma vegetação menos densa ($0,2 < NDVI < 0,3$) e o verde de uma densidade vegetal maior ($0,3 < NDVI < 0,5$). Pelo emprego do algoritmo SEBAL e imagens Landsat - 5, Bezerra (2006) identificou valores entre 200 e $400 W.m^{-2}$ para a vegetação da caatinga, na área do Cariri, Ceará. O padrão da cobertura vegetal da bacia do Acaraú pode ser visto na figura 22.

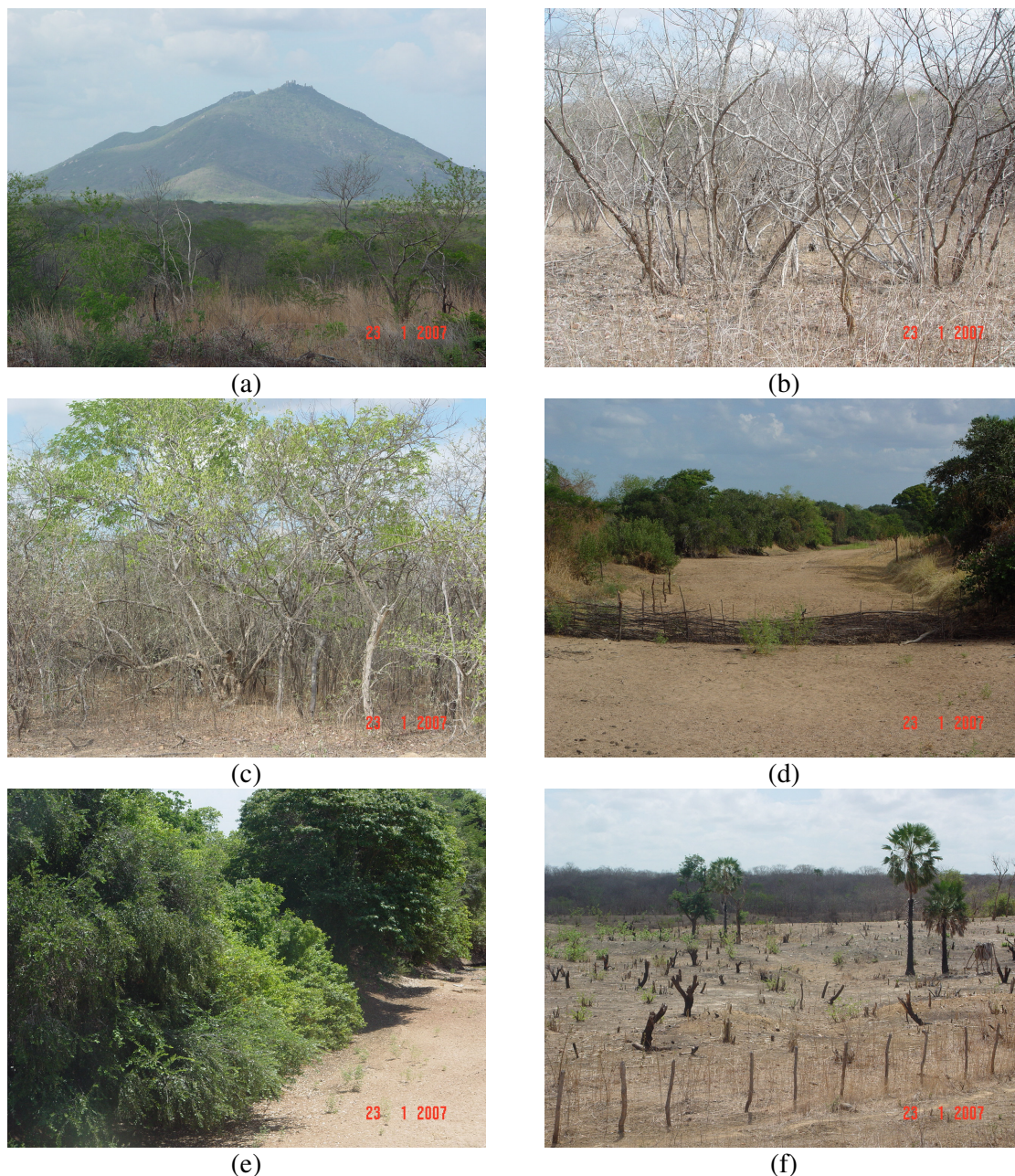


FIGURA 22: Cobertura vegetal da bacia: (a) - caatinga composta com espécies arbóreas e arbustivas de maior densidade (373435.50; 9554096.35); (b) - cobertura com espécies de menor porte, totalmente isenta de folha (337903.00; 9564712.00); (c) - caatinga com maior densidade de espécies arbóreas (334603.04; 9572481.96); (d) - mata ciliar do rio jacurutu (oiticica, ingazeira 355152.88, 9530403.27); (e) - mata ciliar do riacho dos macacos (predominância de cobertura oiticicas 335695.56, 9556232.28) e (f) - queimadas para introdução de cultura de subsistência (milho x feijão) (335126.58; 9568507.55).

Os pixels que identificam um λET entre 340 e 460 $W.m^{-2}$ estão representados pela vermelha. Estas zonas representam as áreas irrigadas, áreas em bem próximas aos corpos d'água, áreas com maior densidade de vegetação e àquelas que recebem influência das nuvens presentes na cena. Nestas áreas, encontra-se uma vegetação de maior densidade ($0,4 < NDVI < 0,5$) quer pela presença das áreas irrigadas quer pela vegetação natural favorecida com a perenização dos cursos d'água. Este intervalo de NDVI identifica áreas com uma cobertura composta por vegetais de maior porte ou pomares e culturas irrigadas (Ippoliti-Ramilo, 1999).

A distribuição espacial do λET apresenta uma forte semelhança com a distribuição do fluxo de calor sensível. Observa-se, também, nesta imagem a influência dos dois cursos d'água perenizados sobre a distribuição espacial do fluxo de calor latente. As áreas que apresentam um fluxo de calor latente variando de 220 a 460 $W.m^{-2}$, tonalidades de verde escuro e vermelho apresentam uma maior concentração em torno do rio Acaraú e Groaíras. Autores como Sobrino et al. (2005) e Malek & Bingham (1997) afirmam que a variabilidade espacial do fluxo de calor latente (λET) apresenta uma estreita relação entre a variabilidade das espécies vegetais e a umidade do solo. Já o fluxo de calor latente variando entre 460 e 580 $W.m^{-2}$ foi registrado nos corpos d'água existentes na imagem. Estes valores confirmam os observados por Bezerra (2004) para as águas do lago de Sobradinho e do rio São Francisco.

A Figura 23 apresenta a distribuição dos pixels que compõem a imagem do fluxo de calor latente da área em estudo. Pela referida figura, observa-se que aproximadamente 80% do fluxo de calor latente se encontra entre 100 e 340 $W.m^{-2}$.

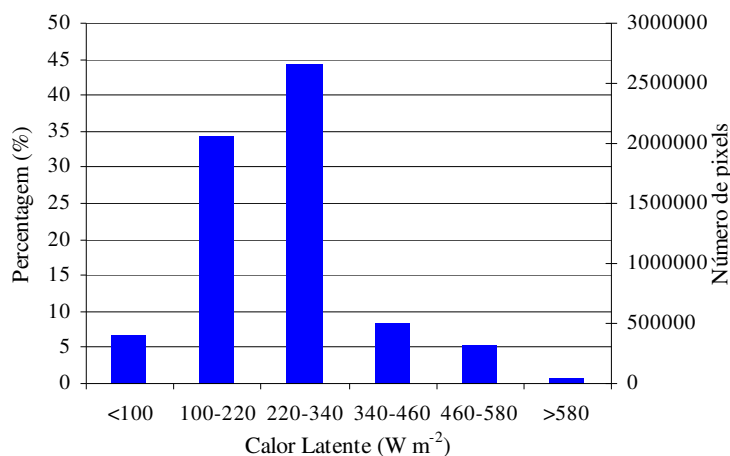


FIGURA 23: Histograma de frequência do calor latente (λET) para o dia 01/09/2004

Os valores extremos registrados para λET atingiram intensidades de 731 W.m^{-2} , confirmando os encontrados por Bezerra (2006) que ficaram em torno de 730 W.m^{-2} para a região do Cariri, Ceará no dia 288 da calendário Juliano.

A Tabela 8 apresenta os atributos estatísticos dos parâmetros determinantes do balanço de radiação computada pelo algoritmo SEBAL. Observa-se valores do fluxo de calor sensível variando de 10 a 457 W.m^{-2} . Os menores fluxos de calor sensível foram registrados nos corpos d'água e os máximos nas áreas de solo exposto. Por outro lado, a maior disponibilidade de energia a ser empregada no processo de evapotranspiração foi registrada nos corpos hídricos.

TABELA 8: Estatística descritiva dos componentes do balanço de energia na superfície para o terço médio da bacia do Acaraú. Data: 01/09/2004

Estatísticas	G (W.m^{-2})	H (W.m^{-2})	λET (W.m^{-2})
Média	113,37	233,97	359,92
Média Ponderada	92,84	223,12	252,39
Mediana	110,81	231,10	362,49
Moda	92,55	242,93	250,65
Desvio padrão	63,11	137,00	211,32
Intervalo	215,81	447,82	699,35
Mínimo	5,46	10,03	10,25
Máximo	221,28	457,88	709,60

4.5. Evapotranspiração

Os resultados alcançados para a evapotranspiração estão expressos em valores diários, ou seja, em mm.dia^{-1} , embora tenham sido obtidos inicialmente na forma instantânea, para o momento de passagem do satélite, e em seguida integrados para um período de 24 horas. O cômputo da ET (mm.dia^{-1}) iniciou-se pela estimativa da fração da evapotranspiração de referência horária (FET_{0_H}), a qual expressa a razão entre a ET horária (SEBAL) e a evapotranspiração de referência horária (ET_{0_H}). O processo foi composto das seguintes etapas:

► Transformar o fluxo de calor latente em milímetro de evaporação equivalente por hora (ET_H), dividindo-se o λET pelo produto do calor latente de vaporização e densidade da água ($L \cdot \rho = 2,45 \times 10^6 \text{ J.kg}^{-1} \times 103 \text{ kg.m}^{-3}$) e multiplicando-se por 3600;

► Computar a fração da evapotranspiração de referência horária pela seguinte relação

$$FET_{0_H} = \frac{ET_H}{ET_{0_H}} \dots\dots\dots (47)$$

onde: ET_H – Evapotranspiração horária determinada pelo algoritmo SEBAL;

ET_{0_H} - evapotranspiração de referência horária, calculada para o horário de passagem do satélite, 9:00 h as 10:00 h, seguindo-se a metodologia proposta por Allen et al. (2002) e apresentada no item Materiais e Métodos. Os dados empregados no computo da evapotranspiração de referência horária foram fornecidos pela Funceme;

► Através de uma relação entre a fração de evapotranspiração de referência horária (FET_{0_H}) e a fração de evapotranspiração de referência em 24 horas ($FET_{0_{24}}$), obtêm-se a evapotranspiração acumulada de 24 horas (ET_{24}).

A Figura 24 mostra o mapa da fração de evapotranspiração de referência horária para o DJ = 244. A cor verde limão identifica as áreas em que a FET_{0_H} é menor que 0,20, a qual corresponde a 3,6% da área total. Esta região apresentou os maiores valores de H e uma cobertura vegetal com NDVI variando de 0,1 a 0,2, o que caracteriza um solo sem cobertura vegetal ou com espécies vegetais que perderam totalmente as folhas em decorrência do déficit hídrico no solo. A tonalidade lilás representa 28,9% da área total e identifica os pixels em que a FET_{0_H} varia entre 0,2 e 0,4. Os pixels de cor amarela e vermelha identificam as áreas com FET_{0_H} de 0,4-0,5 e 0,5-0,5 respectivamente. Estas cores se encontram distribuídas, praticamente, sobre toda a área estudada sem formar um agrupamento definido de cada classe. As tonalidades branca e azul representam as áreas onde FET_{0_H} varia de 0,6-0,8 e 0,8, respectivamente.

As zonas que apresentaram $0,6 < FET_{0_H} < 0,8$ são identificadas pela cor branca e aquelas representadas pela cor azul corresponde a uma FET_{0_H} maior que 0,8. Estas tonalidades identificam as áreas irrigadas e as que se encontram bem próximas aos reservatórios, formando uma moldura em torno dos mesmos. O valor médio de FET_{0_H} para a parte média superior da bacia do Acaraú foi de 0,5. Kimura et al. (2007) em estudo sobre a bacia do rio Liudaogou localizada na Província de Shaanxi, China, empregando o SEBAL, encontrou uma alta frequência de valores da FET_{0_H} igual a 0,5. A Figura 25 apresenta a distribuição de frequência do FET_{0_H} .

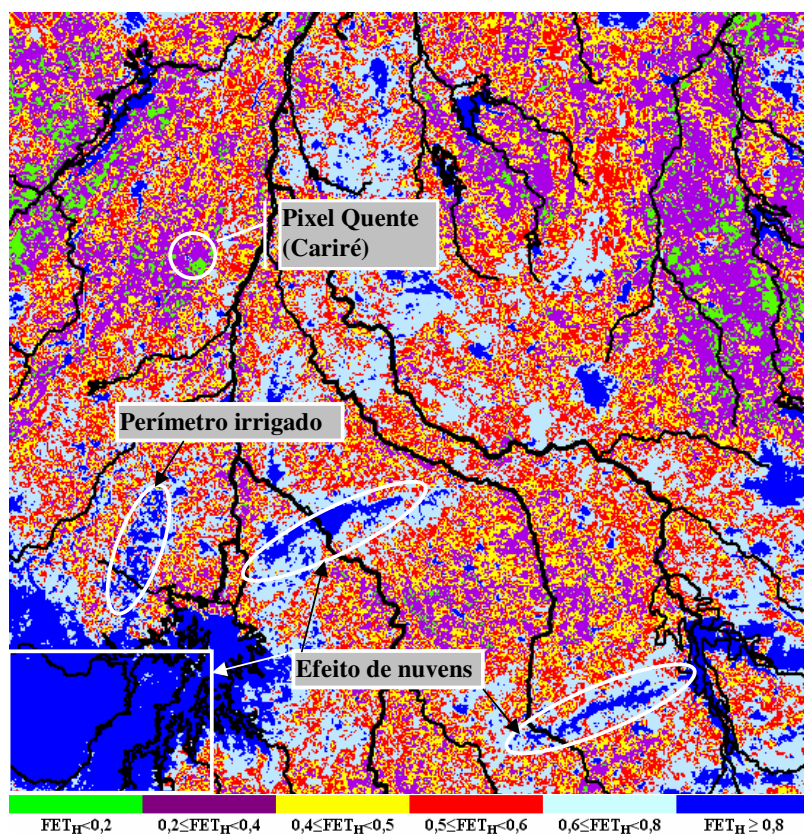


FIGURA 24: Imagem da fração da evapotranspiração de referência horária para o dia 01/09/2004.

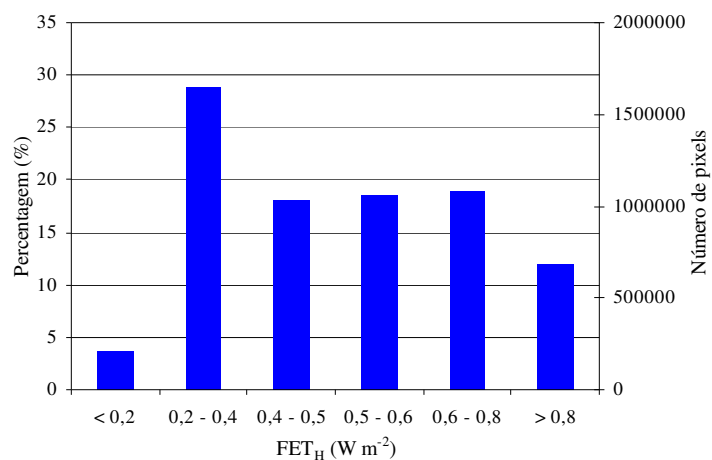


FIGURA 25: Histograma de frequência da fração da evapotranspiração de referência horária (FET_{0_H}) para o dia 01/09/2004.

Os valores de $ET_{diária}$ foram obtidos pelo produto entre a evapotranspiração de referência horária acumulada ($ET_{0_{24}}$) para o DJ 244 e a fração da evapotranspiração de

referência em 24 horas ($FET_{0,24}$) Os cálculos da evapotranspiração de referência em 24 horas, $ET_{0,24}$, bem como os da evaporação de referência horária $ET_{0,H}$, foram efetuados pelo método FAO Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998). A imagem representando a evapotranspiração diária para a região do terço médio da bacia do Acaraú pode ser vista na Figura 26.

Os pixels identificados pela tonalidade azul representam as áreas com valores de ET inferiores a $1,5 \text{ mm.dia}^{-1}$. Estas áreas correspondem a áreas com solo exposto ou vegetação desprovida de folhas em decorrência da estação seca.

A cor verde limão representa as áreas com valores de $ET_{diária}$ entre $1,5$ e $3,0 \text{ mm.dia}^{-1}$. Pode-se observar que esta tonalidade pontua diferentes áreas da imagem sem apresentar grandes agrupamentos; uma maior concentração ocorre no quadrante direito superior. Esta zona se enquadra no semi-árido cearense, onde iremos encontrar uma vegetação adaptada às condições de déficit hídrico e que durante a estação seca as espécies vegetais perdem as folhas em quase sua totalidade. Os pixels em cor marrom claro identificam as áreas com $ET_{diária}$ variando de $3,0$ a $4,5 \text{ mm.dia}^{-1}$. Observa-se que essa tonalidade é predominante na imagem e representa $36,8\%$ da área total. Já as áreas que cor verde escura identificam valores de $ET_{diária}$ entre $4,5$ e $6,0 \text{ mm.dia}^{-1}$.

Analisando-se a imagem, percebe-se que estas áreas partem dos extremos esquerdo e direito da parte inferior da imagem onde estão localizados os reservatórios Paulo Sarasate e Edson Queiroz, respectivamente. Este comportamento sugere que estas áreas representam uma vegetação mais densa, com um NDVI em torno de $0,5$ devido os cursos d'água que já se encontrarem perenizados pelos reservatórios supra citados com conseqüente aumento da disponibilidade hídrica para a vegetação.

As áreas em cor amarela representam valores de $ET_{diária}$ para o intervalo de $6,0$ a $7,0 \text{ mm.dia}^{-1}$. Estas áreas identificam as áreas irrigadas, áreas próximas aos reservatórios, áreas que em decorrência do aspecto da topografia, se encontravam à sombra no momento de passagem do satélite (9:30 h) e zonas que se encontram sobre a influência das nuvens. O Perímetro Araras Norte é o campo irrigado mais importante nesta área da bacia, sendo explorado por banana, mamão, coco e videira. Os valores de $ET_{diária}$ encontrado nesta pesquisa para diferentes uso da terra são apresentados na Tabela 9. O Perímetro Irrigado do Araras Norte e a mata ciliar mais densa apresentaram valores de vapotranspiração bem próximos (Tabela 9), com taxas de $6,93$ e $6,28 \text{ mm.dia}^{-1}$, respectivamente. Acredita-se que as perdas em trânsito ocorridas no leito dos rios perenizados possam, de alguma forma, vir a influenciar as taxa de evapotranspiração das áreas próximas a estes cursos. (RÊGO, 2001).

As taxas mais elevadas de “perdas” de água para a atmosfera foram registrados nos corpos d’água ($7,5 \text{ mm.dia}^{-1}$). Pode-se observar que apesar dos quatro maiores reservatórios inseridos na área de estudo apresentarem formas, profundidades e volumes armazenados diferenciados (Tabela2), a taxa de evaporação foi a mesma em todos eles. Ayenew (2003) em estudos da evaporação em lagos na Etiópia observou que os lagos que expressavam um maior albedo apresentaram uma menor taxa de evaporação.

As áreas de mata nativas apresentaram uma ET de $2,28 \text{ mm.dia}^{-1}$. Os valores de $ET_{\text{diária}}$ observados neste estudo foram semelhantes aos registrados por Bezerra (2006) em áreas irrigadas na região do Cariri, e foram superiores, aqueles identificados por Sobrino (2005). O primeiro autor observou valores de $ET_{\text{diária}}$ em áreas irrigadas em torno de $7,2 \text{ mm dia}^{-1}$ na região da Chapada do Araripe. Já o segundo autor encontrou valores médios de $5,0 \text{ mm dia}^{-1}$ em áreas irrigadas na região de Castilha, Espanha.

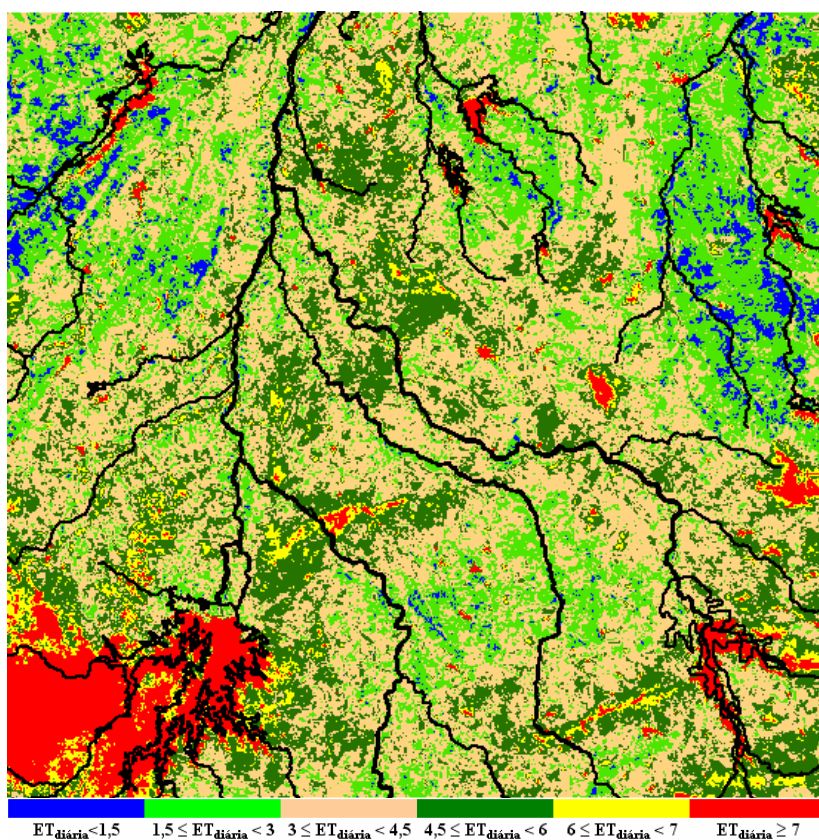


FIGURA 26: Imagem da $ET_{\text{diária}}$ (mm.dia^{-1}) para o dia 01/09/2004.

TABELA 9: Valores de $ET_{diária}$, ET_0 diária e FET_H para o dia de passagem do satélite (01/09/2004)

Locais	Coordenadas (UTM*)		FET_H	ET_{24} (mm.dia ⁻¹)	$ET_{diária}$ (mm.dia ⁻¹)
	X	Y			
Açude Paulo Sarasate	337151.74	9532851.23	1,04	7,14	7,43
Açude Edson Queiroz	382835.99	9532414.06	1,05	7,14	7,50
Açude Jaibaras	330703.49	9577989.01	1,05	7,14	7,50
Açude Forquilha	361633.25	9578207.60	1,04	7,14	7,43
Perímetro Irrigado Araras Norte	332780.04	9540283.12	0,97	7,14	6,93
Vegetação nativa	361347.40	9541521.92	0,32	7,14	2,28
Mata Ciliar	343433.42	9565491.64	0,89	7,14	6,35

*Datum WGS 84; Projeção UTM, Zona 24S

5. CONCLUSÕES

- ✓ Os menores percentuais de energia refletida (albedo) e as maiores taxas de evaporação foram registradas nas superfícies líquidas dos açudes ($7,5 \text{ mm.dia}^{-1}$);
- ✓ Os menores valores de R_n na cena foram registrados nos pixels correspondentes a mineradora de granito, albedo $> 40\%$, expressando a importância do albedo sobre o balanço de energia na superfície;
- ✓ A distribuição espacial do fluxo de calor no solo apresentou uma repartição semelhante as manchas dos dois tipos de solo predominantes da área em estudo. 94% da área apresentou um fluxo de calor do solo (G) variando de 50 a 100 W.m^{-2}
- ✓ Percebeu-se a influência da perenização dos cursos d'água na umidade do solo nas proximidades dos mesmos, encontrando-se para alguns trechos da mata ciliar valores de NDVI e de evapotranspiração diária bem próximos dos observados nas áreas irrigadas;
- ✓ Através do algoritmo SEBAL identificou-se pontos isolados de albedo superior a 40% , os quais correspondiam a mineradoras de granito, portanto, acredita-se que este algoritmo poderá vir a ser uma forte ferramenta no monitoramento de uso da terra;
- ✓ Existe uma alta potencialidade do emprego do SEBAL em estudos de desertificação, alterações na vegetação e uso da terra, uma vez que a identificação em mudanças das espécies pode ocorrer pelo estudo das cartas de calor latente ou evapotranspiração;
- ✓ As menores taxas de evapotranspiração diária ($ET_{\text{diária}} < 1,5 \text{ mm.dia}^{-1}$) foram registradas nas manchas de solos Litólicos, e as maiores nas áreas irrigadas, expressando a sensibilidade do algoritmo SEBAL na estimativa da evapotranspiração em escala de bacias hidrográficas;

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHRENS, C. D., **Essentials of Meteorology - A Invitation to the Atmosphere**, 4^a edição, Thompson Brooks/Cole, 2005, 480 p, Capítulo 2 (warming the earth and the atmosphere), p. 26-52, Belmont, Califórnia, USA.
- AKBARI, M.; TOOMANIAN, N.; DROOGERS, P.; BASTIAANSEN, W.; GIESKE, A., **Monitoring irrigation performance in Esfahan, Iran, using NOAA satellite imagery**. Agricultural Water Management, v. 88, issue 1-3, p. 99-109, 2007.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M., **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. p. 300, (FAO. Irrigation and drainage paper, 56).
- ALLEN, R. G.; TREZZA, R.; TASUMI M. **Surface energy balance algorithms for land - Advance training and users manual**, version 1.0, p. 98, 2002.
- ATAÍDE, K. R. P., **Determinação do saldo de radiação e radiação solar global com produtos do sensor Modis Terra e Aqua**, Campina Grande, 105f, Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, 2006.
- AYENEW, T., **Evapotranspiration estimation using thematic mapper spectral satellite data in the Ethiopian rift and adjacent highlands**, Journal of Hydrology, n. 279, p. 83-93, 2003.
- BASTIAANSEN, W. G. M., **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain**, Tese (Ph.D.), Wageningen Agricultural University, Wageningen, Netherlands, 273f, 1995.
- BASTIAANSEN, W. G. M., **SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey**, Journal of Hydrology, n. 229, p. 87-100, 2000.
- BASTIAANSEN, W. G. M.; BOS, M. G., **Irrigation performance indicators base don remotely sensed data: a review of literature**. Irrigation and Drainage Systems, v. 13, n. 4, Springer Netherlands, ISSN 0168-6291 (Print), p. 291-311, dezembro, 1999.

- BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M., **A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1, Validation**, Journal of Hydrology, n. 212-213, p. 213-229, 1998.
- BERLATO, M. A.; MOLION, L. C. B., **Evaporação e evapotranspiração**, Porto Alegre: IPAGRO/ Secretaria de Agricultura, 95 p, (Boletim Técnico, 7), 1981.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C., **Manual de Irrigação**, 7ª edição, Editora UFV, 2005.
- BEZERRA, B. G., **Obtenção da evapotranspiração diária no Cariri Cearense utilizando imagens Landsat 5-TM e o algoritmo SEBAL**, 135 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2006.
- BEZERRA, F, M, L,.; OLIVEIRA, C, H, C, de, **Evapotranspiração máxima e coeficiente de cultura nos estádios fenológicos da melancia irrigada**, Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v,3, n,2, p,173-177, Campina Grande, PB, DEAg/UFPB, 1999.
- BEZERRA, M. V. C., **Balço de Energia em Áreas Irrigada Utilizando Técnicas de Sensoriamento Remoto**. 108f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2004.
- BRUTSAERT, W., **Evaporation into the Atmosphere**. D. Reidel, p. 229, 1982.
- CHANDER, G., MARKHAM, B. L., **Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges**. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, v. 41, n. 11, november, 2003.
- CHEN, J, M., CHEN, X., JU, W., GENG, X. **Distributed hydrological model for mapping vapotranspiration using remote sensing inputs**. Journal of Hydrology, n. 305, p. 15-39, 2005.

CHOUDHURY, B. J.; AHMED, N. U.; IDSON, S. B.; REGINATO, R. J.; DAUGHTRY, C. S. T., **Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations**, Remote Sensing of Environmental, v. 50, p. 1-17, 1994.

COGERH, **Programa de gerenciamento das águas territoriais**, Convênio COGERH/DNOCS, Boletim técnico, Fortaleza, 2001.

CRÓSTA, A. P., **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**, Campinas, SP : UNICAMP, p. 170, 1992.

DINGMAN, S. L., **Physical Hidrology**, 2ª edição, Prentice hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1994.

DNOCS, Projetos. Disponível em:

<<http://201.30.148.11/~apoena/php/projetos/projetos.php>>. Acessado em: 09/11/2006.

DOORENBOS, J., PRUITT, W.O., **Crop water requirements**. Rome: FAO, 1977, p. 144, (FAO. Irrigation and drainage paper, 24).

EMBRAPA, Satélites de Monitoramento, Cbers. Disponível em:

<<http://www.sat.cnpm.embrapa.br/satelite/cbers.html>>. Acessado em: 10/11/2006a.

EMBRAPA, Satélites de Monitoramento, Landsat. Disponível em:

<<http://www.sat.cnpm.embrapa.br/satelite/landsat.html>>. Acessado em: 10/11/2006b.

EMBRAPA, **Sistema Brasileiro de Classificação de solos**, 2ª edição, Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ, 2006c.

ENERGIASRENOVAVEIS, Solar, Fonte. Disponível em:

<http://www.energiasrenovaveis.com/html/energias/solar_fonte.asp>. Acessado em: 13/11/06.

ENGESAT. Programa Landsat, Landsat 5 TM – Ficha Técnica Resumida. Disponível em: <<http://www2.engesat.com.br/?system=news&action=read&id=528>>.

Acessado em 09/11/2006.

- FARIA, R. A. de; SOARES, A. A.; SEDIYAMA, G. C.; RIBEIRO, C. A. Á. S., **Economia de água e energia em projetos de irrigação suplementar no Estado de Minas Gerais**, Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 6, n. 2, p. 189-194, Campina Grande, PB, DEAg/UFPB, 2002.
- FEITOSA, J. R. P., **Uso de Técnica de Sensoriamento Remoto e Imagens Landsat-Tm e NOAA-AVHRR na estimativa do balanço de radiação à superfície**. 164f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais). Programa Institucional de Pós-graduação em Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2005.
- FERREIRA, N. J., **Aplicações ambientais brasileiras dos satélites NOAA e TIROS-N**, São Paulo, Oficina de textos, 272p, 2004.
- FILHO, F, F, L, S, **Gestão de recursos hídricos em áreas do semi-árido nordestino para o desenvolvimento sustentável**, XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa, PB, 2005.
- FLERCHINGER, G. N.; COOLEY, K. R., **A ten-year water balance of a mountainous semi-arid watershed**, Journal of Hydrology, n. 237, p. 86–99, 2000.
- GOMES, A. R., **Avaliação da vulnerabilidade à perda de solo em região semi-árida utilizando sensoriamento remoto e geoprocessamento – área piloto de Parnamirim (PE)**, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, SP, 160p, 2000.
- GRANGER, R. J., **Satellite-derived estimates of evapotranspiration in the Gediz basin**, Journal of Hydrology, n. 229, p. 70-76, 2000.
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Divisão de Sensoriamento Remoto, Educação, Primórdios. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/primordios_sr.htm>. Acessado em: 13/11/2006a.
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <<http://www.itid.inpe.br/selper/image/caderno2/cad20.htm>>. Acessado em: 14/11/2006b.
- IPLANCE - *Atlas do Ceará*. Fortaleza, CD-ROM, 1997.

IPPOLITI-RAMILO, G. A., **Imagens TM/Landsat – 5 da época de pré-plantio para a previsão da área de culturas de verão**, Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), 185f, INPE, 1999.

JACOBS, J. M.; MYERS, D. A.; ANDERSON, M. C.; DIAK, G. R., **GOES surface insolation to estimate wetlands evapotranspiration**, Journal of Hydrology, n. 266, v. 1-2, p. 53-65, 2002.

JARDIM-LIMA, D.; NELSON, B. W., **Uso de índices de vegetação no monitoramento da cobertura verde no perímetro urbano da cidade de Manaus**, Anais XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Belo Horizonte, Brasil, 05 a 10 de abril, INPE, p. 1827 – 1833, 2003.

JURY, W. A.; GARDNER, W. R.; GARDNER, W. H., **Soil Physics**, 5ª edição, John Wiley & Sons, Inc., New York - USA, 1991.

KIMURA, R. L. B.; FAN, J.; TAKAYAMA, N.; HINOKIDANI, O., **Evapotranspiration estimation over the river basin of the Loess Plateau of China based on remote sensing**. Journal of Arid Environments, n. 68, p. 53-65, 2007.

KUSTAS, W. P.; NORMAN, J. M., **Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surface**, IAHS Hydrol, Science Journal, v. 4, n. 41, p. 495-516, 1996.

LOESCHER, H. W.; GHOLZ, H. L.; JACOBS, J. M.; OBERBAUER, S. F., **Energy dynamics and modeled evapotranspiration from a wet tropical forest in Costa Rica**, Journal of Hydrology, n. 315, p. 274-294, 2005.

MALEK, E.; BINGHAM, G. E., **Partitioning of radiation and energy balance components in a inhomogeneous desert valley**, Journal of Arid Environments, n. 37, p. 193-207, 1997.

MARKHAM, B. L., BARKER, J. L. **Thematic mapper band pass solar exoatmospherical irradiances**. International Journal of Remote Sensing, v. 8, n. 3, p. 517-523, 1987.

MCT - Ministério de Ciências e Tecnologia, Programa Nacional de Atividades Espaciais, Agência Espacial Brasileira, Satélites. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/35361.html>>. Acessado em: 09/11/2006.

MENDES. C. A. B.; CIRILO. J. A., **Geoprocessamento em recursos hídricos – princípios, integração e aplicação**, Porto Alegre, RS, ABRH, Coleção Geoprocessamento, v. 1, 2001.

MESQUITA, T. B de., **Caracterização da qualidade das águas empregadas nos distritos irrigados da bacia do Acaraú**, Fortaleza, 63f, Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Ceará, 2004.

MOREIRA, M. A., **Fundamento do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**, 2ª edição (Revista e Ampliada), Editora UFV, Viçosa-MG, 2003.

MORSE, A.; ALLEN, R.; TREZZA, R.; TASUMI, M.; KAMBER, W.; WRIGHT, J., **Application of the SEBAL methodology for estimating evapotranspiration and consumptive use of water through remote sensing, Phase II, Part I: Summary Report**. Idaho Department of Water Resources, University of Idaho, 2001.

MORSE, A.; TASUMI, M.; ALLEN, R. G.; KRAMBER, W. J., **Application of the SEBAL Methodology for Estimating Consumptive Use of Water and Streamflow Depletion in the Bear River Basin of Idaho through Remote Sensing – Final Report**. Idaho Department of Water Resources, University of Idaho, 2000.

NAIR, U. S.; RAY, D. K.; WELCH, R. A. P; CRISTOPHER, S. A., **Use of MODIS derived broadband albedo in the RAMS**, Abstract for 19th Conf. on Hydrology, 85th AMS Annual Meeting, 9-13 jan, San Diego, Califórnia, USA, 2005.

NÓBREGA, J. Q.; RAO, T. V. R.; BELTRÃO, N. E. de M.; FILHO, J. F., **Avaliação do efeito do estresse hídrico no rendimento do feijoeiro por sensoriamento remoto termal**, Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, SP, v. 12, n. 2, p. 299-305, 2004.

NOVO, E. M. L. de M., **Sensoriamento remoto - princípios e aplicações**, São Paulo, Editora Edgard Blücher, p. 308, 1992.

PAIVA, C. M., **Estimativa do balanço de energia e da temperatura da superfície via satélite NOAA-AVHRR**, Rio de Janeiro, 248f, Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

RAY, S. S.; DADHWAL, V. K., **Estimation of crop evapotranspiration of irrigation command area using remote sensing and GIS**, Agriculture Water Management, v. 49, p. 239-249, 2001.

RÊGO, T. C. C. C., **Avaliação da perda d'água em trânsito na bacia do rio Jaguaribe**, Fortaleza, 85f, Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal do Ceará, 2001.

SILVA, B. B. da ; FEITOSA, J. R. P.; MOURA, M. S. B.; GALVÍNIO, J. D., **Determinação do albedo do perímetro irrigado Nilo Coelho com técnicas de sensoriamento remoto e imagens Landsat 5- TM**. XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Foz do Iguaçu, São José dos Campos, SBMET, p. 2897-2902, 2002.

SILVA, B. B. da ; Cândido, M. V., **Determinação da evapotranspiração em escala regional através do Sebal e imagens Landsat 5 - TM**. In: XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Fortaleza. A Meteorologia e o desenvolvimento sustentável., CD, 2004.

SILVA, B. B. da; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. de, **Determinação do Albedo em áreas irrigadas com base em imagens Landsat 5-TM**, Revista Brasileira de Meteorologia, v. 13, n. 2, p. 201-211, 2005.

SILVEIRA, S. S., **Análise da componente principal como ferramenta para estimar os parâmetros meteorológicos de maior influência para o processo da evapotranspiração no Estado do Ceará**, Fortaleza, 60f, Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Ceará, 2000.

SOBRINO, J. A.; GÓMEZ, JIMÉNEZ-MUÑOZ, M.; OLIOSO, J. C. A.; CHEHBOUNI, G., **A simple algorithm to estimate evapotranspiration from DAIS data: Application to the DAISEX campaigns**, Journal of Hydrology, n. 315, p. 117-125, 2005.

SOUSA, B. F. S., **Emprego de imagens de satélite CBERS na definição do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do alto Piauí, Piauí**. Fortaleza, 65f, Monografia (Graduação em Agronomia) - Universidade Federal do Ceará, 2006.

SRH, **Atlas Eletrônico dos Recursos Hídricos e Meteorológicos do Ceará**.

Disponível em: <http://atlas.srh.ce.gov.br/obras/acudes_estado.asp?>. Acessado em: 09/11/2006.

TASUMI, M., **Use of Remote Sensing of Evapotranspiration for Large Regions**, International Workshop, Montpellier, France, 2003.

TREZZA, R., **Evapotranspiration using a satellite-based Surface energy balance with Standardized ground control**. 247f. Tese (Doctor of Philosophy in Biological and Agricultural Engineering), Utah State University, Logan, Utah, 2002.

UFRPE - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Tecnologia Rural, Laboratório de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto, Geosere. Disponível em: <<http://www.ufrpe.br/geosere/conteudo/noaa.html>>. Acessado em: 09/11/2006.

WELIGEPOLAGE, K., **Estimation of spatial and temporal distribution of evaporatranspiration by satellite remote sensing – A case study in Hupselse Beek**, The Netherland, Tese de Mestrado, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, 114f, 2005.

WICHELNS, D.; CONE, D.; STUHR, G., **Evaluating the impact of irrigation and drainage policies on agricultural sustainability**, Irrigation and Drainage Systems, Netherlands, v. 16, n. 1, p. 1-14, 2002.

XAVIER, A. C., **Estimativa de propriedades biofísicas de plantações de eucaliptos a partir de dados Landsat-TM**, São José dos Campos, 117f, Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), INPE, 1998.

Apêndices

APÊNDICE A - Informações técnicas dos satélites

Satélite (Família)	Sensor	Resolução Espectral (µm)	Resolução Espacial	Resolução Radiométrica	Resolução Temporal
Landsat	MSS (L5) (L7)	B1: 0,5-0,6	80 m	64 níveis (6 bits)	18 dias
		B2: 0,6-0,7			
		B3: 0,7-0,8			
		B4: 0,8-1,1			
	TM (L5) (L7)	TM1: 0,45-0,52	30 m	16 dias	
		TM2: 0,52-0,60	120 m (TM6)		
		TM3: 0,63-0,69			
		TM4: 0,76-0,90			
		TM5: 1,55-1,75			
		TM6: 10,4-12,5			
		TM7: 2,08-2,55			
	ETM+ (L7)	B1: 0,45-0,52	30 m	16 dias	
		B2: 0,5-0,60	''		
B3: 0,63-0,69		''			
B4: 0,76-0,90		''			
B5: 1,55-1,75		''			
B6: 10,4-12,5		60 m			
B7: 2,08-2,35		30 m			
B8: 0,5-0,9		15 m			
CBERS (1 e 2)	CCD	PAN: 0,51-0,73	20m		26 dias
		B: 0,45-0,52			(visada vertical)
		G: 0,52-0,59			3 dias
		R: 0,63-0,69			(visada lateral)
	IRMSS	IRP: 0,77-0,89	80 m		26 dias
		PAN: 0,50-1,1			
		IRM: 1,55-1,75			
	WFI	IRM: 20,8-2,35	160 m		5 dias
		IRT: 10,4-12,5	260 m		
		R: 0,63-0,69			
SPOT	XS	IRP: 0,77-0,89	20 m	256 níveis (8 bits)	26 dias
		XS1: 0,5-0,59			
		XS2: 0,61-0,68			
NOAA 12	PAN AVHRR	XS3: 0,79-0,89	10 m	1024 níveis (10 bits)	6 horas
		PAN: 0,51-0,70			
		B1: 0,58-0,68			
		B2: 0,73-1,1			
		B3: 3,55-3,93			
METEOSAT	VIRR TIRR	B4: 10,3-11,3	2500 m	256 níveis (8 bits)	30 minutos
		B5: 11,5-12,5			
ERS	SAR	B1: 0,4-1,05	5000 m	65536 níveis (16 bits)	32 dias
SABIA-3		B2: 10,5-12,5	30 m		
		5,7 cm			
		PAN: 0,51-0,73			
		B: 0,45-0,52			
		G: 0,52-0,59			
R: 0,63-0,69					
IRP: 0,77-0,89					

Fonte: Adaptado de ASSAD & SANO (1998)

APÊNDICE B - Empilhando imagens com o Erdas IMAGINE 8.5 Demo

Uma vez adquirida uma imagem Landsat 5, esta é composta por sete bandas espectrais, numeradas de 1 a 7. Cada banda contém informações sobre uma determinada faixa do espectro eletromagnético, sendo necessário proceder ao empilhamento das bandas para conseguir ter uma visão geral da interação entre elas, formando a imagem.

No Erdas IMAGINE 8.5, o processo de empilhamento das imagens é muito simples e rápido.

1. Clicar em INTERPETER, em seguida UTILITIES e LAYER STACK;
2. Na janela “Leyer Selection and Stacking”, no campo “Imput File” (Figura I), devemos localizar a pasta onde estão os arquivos (bandas), clicando na pastinha aberta;

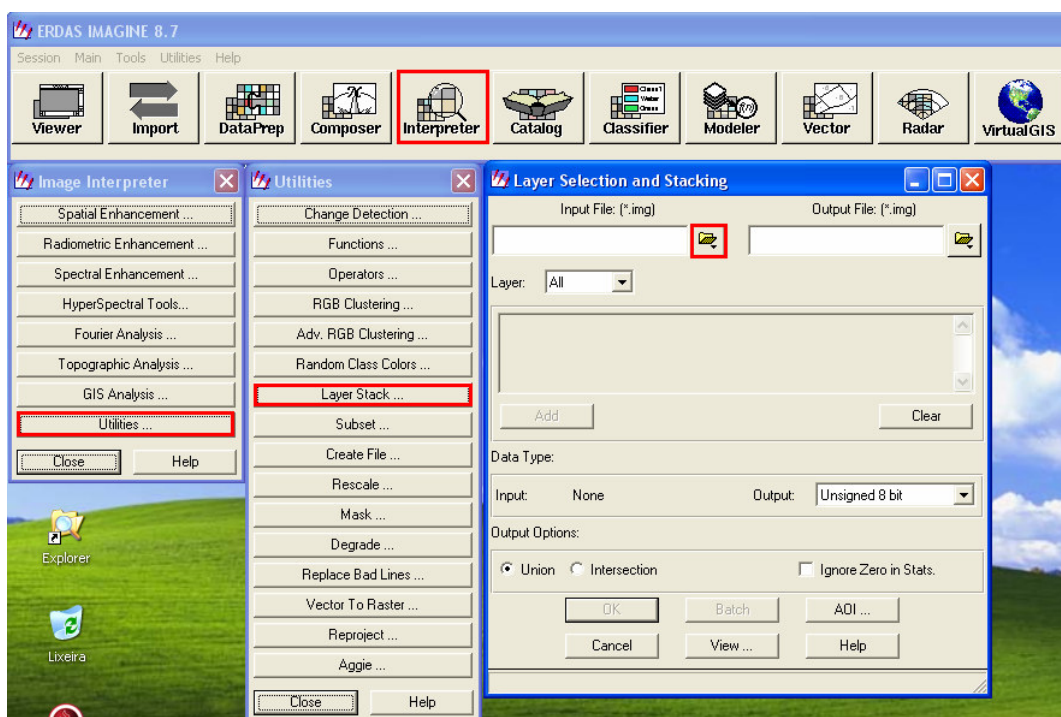


FIGURA I: Etapas do empilhamento de uma imagem Landsat 5-TM

3. Após o passo anterior, abrirá a janela “Input File”, onde deverá ser indicado o local (pasta) onde estão salvas as bandas no formato GeoTIFF.

4. Uma vez localizada a pasta, devemos observar o campo “Files of type” e escolher “TIFF” (Figura II). Com este procedimento, irão aparecer as sete bandas disponibilizadas.

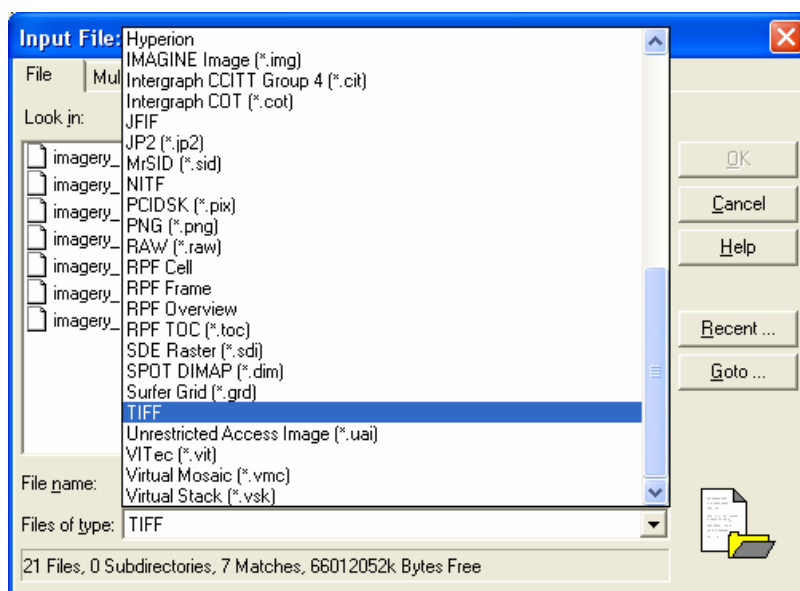


FIGURA II: Escolhendo o tipo de arquivo

5. A Figura III abaixo, mostra que a banda 1 foi adicionada por meio do botão “Add”, o que deverá ser repetido com as demais bandas, de modo seqüencial para que se tenha o empilhamento da imagem completa.

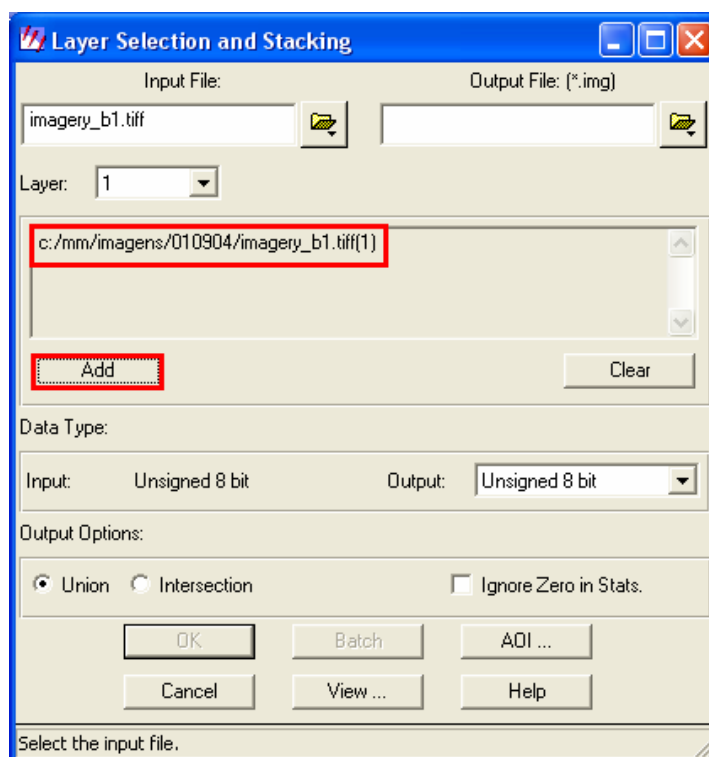


FIGURA III: Adicionando bandas

6. Adicionadas todas as bandas, podemos agora escolher o nome de saída (resultado do empilhamento) do arquivo para visualizar a imagem como um todo.