

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

Disciplina: **Introdução ao sensoriamento remoto por satélite**

Professor: **Bernardo Barbosa da Silva**

## **1. MATERIAL SOBRE BALANÇO DE RADIAÇÃO**

### **1.1 – MATERIAIS**

#### **1.1.1 - Localização da Área de Estudo**

A área selecionada para a pesquisa compreende parte dos Estados de Pernambuco e Bahia, contemplando parte do lago e da barragem de Sobradinho, áreas irrigadas do Projeto Senador Nilo Coelho e parte da área urbana dos municípios de Petrolina - PE e Juazeiro do Norte - BA. O retângulo selecionado possui as seguintes coordenadas: canto superior esquerdo (longitude 40° 36' 36'' Oeste e latitude 09° 16' 36'' Sul), canto superior direito (longitude 40° 12' 10'' Oeste e latitude 09° 16' 42'' Sul), canto inferior direito (longitude 40° 12' 11'' Oeste e latitude 09° 26' 40'' Sul). Na Figura 3.1 está representada a área estudada, resultante de uma composição RGB das bandas 3, 4 e 5, do Landsat 5 – TM.

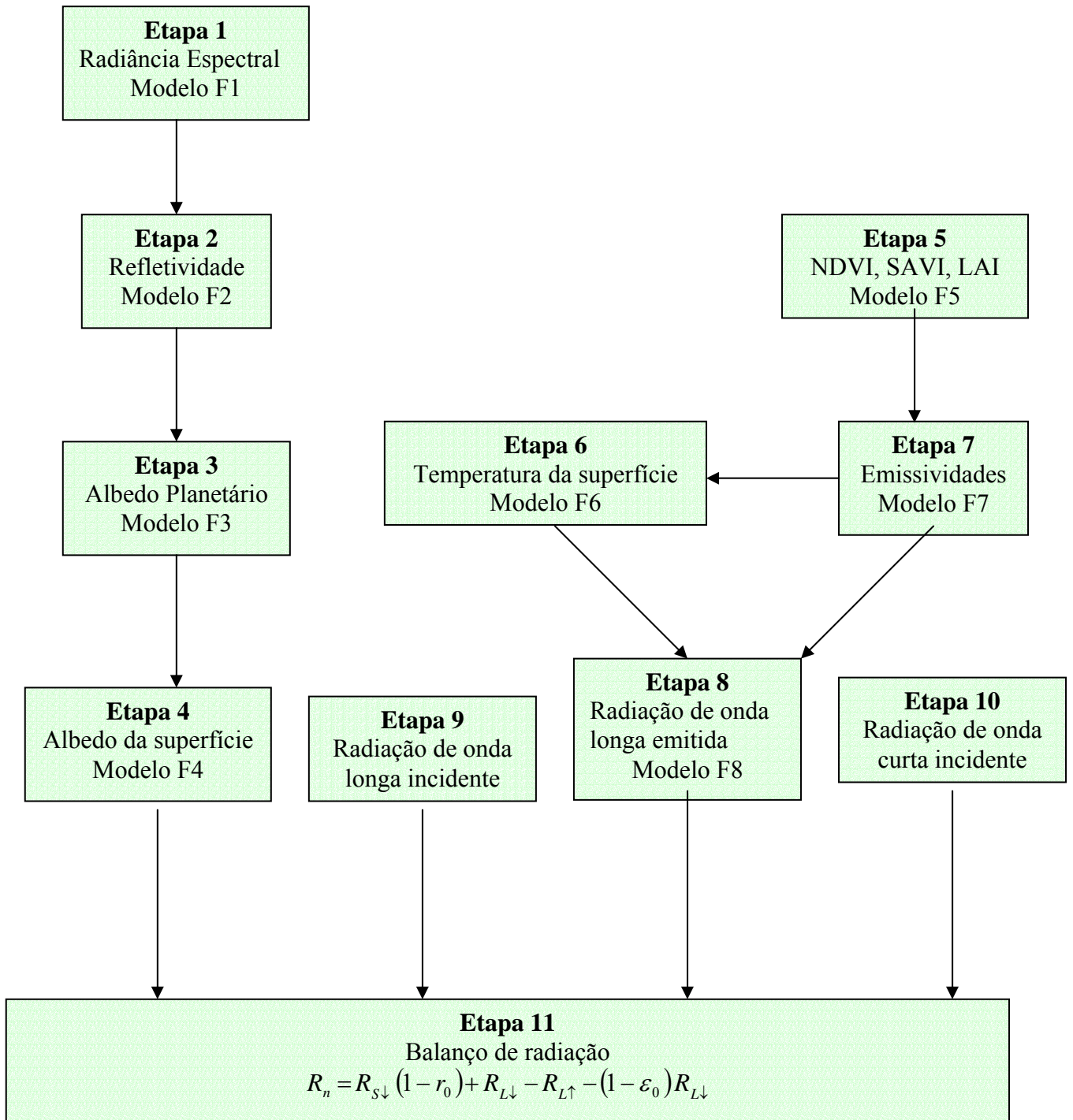
#### **1.1.2 –Imagens de Satélite**

Foram utilizadas duas imagens obtidas pelo Mapeador Temático do satélite Landsat 5, adquiridas junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE de São José dos Campos, e que são compostas de sete bandas espectrais, cujas características estão descritas na Tabela 3.1. Nesta tabela foram incluídas, ainda, a irradiância solar monocromática –  $K_{\lambda,i}$  das bandas reflectivas (canais 1, 2, 3, 4, 5, e 7), incidente sobre uma superfície normal à direção dos raios solares, no topo da atmosfera terrestre e a uma distância de uma Unidade Astronômica - 1 UA. A passagem do Landsat 5 – TM sobre a referida área ocorreu às 9h30 (tempo solar) dos dias 04 de outubro de 2001 (Dia Juliano = 277) e 04 de dezembro de 2000 (Dia Juliano = 338), na órbita 217 e ponto 67. Essa cena foi recortada com o ERDAS e resultou no retângulo mencionado anterior. O TM mede a radiância espectral de cada pixel e os armazena em forma digital. Esses valores são denominados de *nível de cinza*, ou *intensidade do pixel*, ou ainda, *número digital* (ND), e

variam de 0 a 255 (8 bits), no caso do Landsat 5 – TM. Para visualização e realização de operações matemáticas intra e inter bandas, recortes, classificação, realce e outras tarefas, fez-se necessário à utilização de um software apropriado, no caso optou-se pelo ERDAS Imagine 8.5.



**Figura 1-** Área selecionada para a pesquisa, destacando-se o rio São Francisco, parte do Lago e Barragem de Sobradinho, áreas irrigadas e parte da área urbana das cidades de Petrolina, PE e Juazeiro, BA. Em composição RGB das bandas 3, 4 e 5 Landsat 5 - TM, obtida em 04 de dezembro de 2000.



**Figura 2** – Fluxograma com todas as etapas de processamento do Balanço de Radiação à Superfície

**Tabela 1.** Descrição dos canais do Mapeador Temático (TM) do Landsat 5, com correspondentes intervalos de comprimentos de onda, coeficientes de calibração (radiância mínima - *a* e máxima – *b*) e irradiâncias espectrais no topo da atmosfera (TOA).

Descrição dos Canais	Comprimento de onda - $\mu\text{m}$	Coeficientes de calibração - $\text{Wm}^{-2} \text{st}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$		$K_{\lambda}(\lambda_i)$ - $\text{W/m}^2 \mu\text{m}$
		a	b	
Banda 1 (azul)	0,45 – 0,52	-1,500	152,100	1957
Banda 2 (verde)	0,53 – 0,61	-2,800	296,800	1829
Banda 3 (vermelho)	0,62 – 0,69	-1,200	204,300	1557
Banda 4 (infra-vermelho próximo)	0,78 – 0,90	-1,500	206,200	1047
Banda 5 (infra-vermelho médio)	1,57 – 1,78	-0,370	27,190	219,3
Banda 6 (infra-vermelho termal)	10,4 – 12,5	1,238	15,600	-
Banda 7 (infra-vermelho médio)	2,10 – 2,35	-0,150	14,380	74,52

## 1.2 – MÉTODOS EMPREGADOS

Para a obtenção do *Balanco de radiação à superfície* – BRS foram desenvolvidos vários modelos com o *Model Maker* do Erdas, destinados às tarefas descritas nas seções abaixo. Ademais, foram feitas estimativas da radiação solar incidente na área estudada, bem como da radiação de onde longa emitida pela atmosfera, na direção da superfície. Para proporcionar uma melhor compreensão das diferentes etapas de processamento das imagens e modelos utilizados, elaborou-se um fluxograma, que está representado na Figura 2.

### 1.2.1 – Calibração radiométrica – Etapa 1

Uma vez escolhida a área de estudo e processado o seu recorte com o Erdas, partiu-se para a efetivação da *Calibração radiométrica*, que é o processo de conversão do *Número digital* - ND de cada pixel da imagem, em *Radiância espectral monocromática*  $L_{\lambda_i}$ . Para as bandas reflectivas do Landsat 5 – TM, quais sejam: canais 1, 2, 3, 4, 5 e 7, essas radiâncias monocromáticas representam a energia solar refletida por cada pixel, por

unidade de área, de tempo, de ângulo sólido e por unidade de comprimento de onda, porém medida ao nível da órbita do Landsat, que é da ordem de 705 Km de altura. No fluxograma já mencionado, essa compreende a Etapa 01, em que se utilizou a seguinte relação, proposta por Markham & Baker (1987):

$$L_{\lambda i} = a_i + \frac{b_i - a_i}{255} \times ND \quad (1)$$

em que  $a_i$  e  $b_i$  são as radiâncias espectrais mínima e máxima ( $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ , Tabela 3.1), ND é a intensidade do pixel (número inteiro de 0 a 255) e  $i = 1, 2, \dots, 7$ , corresponde às bandas 1, 2, ..., 7, do TM Landsat 5.

### 1.2.2 – Refletância de cada banda do Landsat 5 -TM – Etapa 2

A refletância, tal como percebida pelo satélite, refere-se à razão entre fluxo emergente da atmosfera e o fluxo incidente no seu topo, na região e banda espectral analisada; nesse sentido, a mesma será denominada de *refletância planetária local*, ou simplesmente *refletância planetária*. De posse dos mapas de radiância espectral de cada banda, informações sobre o  $\cos Z$  e irradiância espectral no topo da atmosfera (Tabela 3.1) para cada banda, estimou-se a refletância espectral planetária em cada banda, através da equação (Bastiaanssen, 1995):

$$r_{pi} = \frac{L_{\lambda} \times \pi}{K_{\lambda} \times \cos Z \times d_r} \quad (2)$$

em que  $r_{pi}$  é refletância planetária da banda  $i$ ,  $K_{\lambda}$  é a irradiância solar espectral no topo da atmosfera (Tabela 3.1),  $Z$  é o ângulo zenital do Sol e  $d_r$  é o inverso do quadrado da distância relativa Terra – Sol -  $d_s$ , em unidades astronômicas, que é dada por:

$$d_s = 1 + 0,0167 \operatorname{sen} \left[ \frac{2\pi(J - 93,5)}{365} \right] \quad (3)$$

em que  $J$  é o dia Juliano e o argumento da função seno se encontra em radiano. Por sua vez, o ângulo Zenital do Sol não precisou ser calculado, pois o mesmo se encontrava disponível no cabeçalho das imagens adquiridas para o estudo, quais sejam: para o dia 04 de dezembro de 2000,  $Z = 31,28^\circ$ ; e para o dia 04 de outubro de 2001,  $Z = 30,03^\circ$ . Convém esclarecer que no cabeçalho aludido, é informado o valor do ângulo de elevação do Sol, para as coordenadas do centro da cena original da imagem.

### 1.2.3 – Albedo planetário – Etapa 3

Uma vez obtidos os mapas da refletância planetária de cada uma das seis bandas reflectivas do Landsat 5 – TM, obteve-se o *albedo planetário*, que representa o *albedo não corrigido* de cada pixel da imagem. Para a obtenção do albedo, com base na refletância de bandas que não cobrem totalmente o espectro de 0,3  $\mu\text{m}$  a 3,0  $\mu\text{m}$ , foi utilizada uma combinação linear das refletâncias planetárias obtidas na etapa anterior, segundo procedimento utilizado por Bastiaanssen (1995), válido para dias de céu claro, qual seja:

$$r_{p_i} = 0,293r_{p_1} + 0,274r_{p_2} + 0,233r_{p_3} + 0,157r_{p_4} + 0,033r_{p_5} + 0,011r_{p_7} \quad (4)$$

em que  $r_{p_1}$ ,  $r_{p_2}$ ,  $r_{p_3}$ ,  $r_{p_4}$ ,  $r_{p_5}$  e  $r_{p_7}$  são os albedos planetários nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7.

### 1.2.4 – Albedo da Superfície – Etapa 4

No SEBAL o *albedo da superfície*, ou o albedo corrigido devido aos efeitos atmosféricos, tem sido obtido através da expressão abaixo (Bastiaanssen, 1995; Morse et al., 2001; Allen et al., 2002), que foi usado nesta pesquisa e que se aplica a dias de céu claro:

$$r_0 = \frac{r_p - a}{b} \quad (5)$$

em que  $a$  representa o albedo da atmosfera (valores de 0,025 a 0,035) e  $b$  corresponde ao quadrado da transmissividade atmosférica,  $\tau_{sw}$ , que pode ser obtida segundo expressão proposta por Allen et al. (2002):

$$\tau_{sw} = 0.75 + 2 \times 10^{-5} \times z \quad (6)$$

em que  $z$  representa a altitude de cada pixel. Como forma de simplificar a sua aplicação, escolheu-se a altitude de Petrolina (376 m), para fins de cálculo de  $\tau_{sw}$ , e admitiu-se que na área estudada a mesma era constante, conforme tem sido adotado em outros estudos (Bastiaanssen, 1995; Morse et al., 2001; Allen et al., 2002, Silva et al., 2002). Para  $a$  escolhe-se o valor 0,03, por não se dispor de informações que possibilitassem escolha mais precisa.

### 1.2.5 – Índices de vegetação NDVI, SAVI e IAF – Etapa 5

Para a obtenção do *índice de vegetação da diferença normalizada* – NDVI, utilizou-se a seguinte expressão:

$$NDVI = (r_{p4} - r_{p3}) / (r_{p3} + r_{p4}) \quad (7)$$

em que  $r_{p3}$  e  $r_{p4}$  correspondem às refletâncias das bandas 3 e 4 do Landsat 5 – TM.

Para o cálculo do índice de área foliar – IAF, utilizou-se expressão empírica obtida por Allen et al. (2002), qual seja:

$$LAI = - \frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (8)$$

em que SAVI é o índice de vegetação com ajuste do solo (Soil adjusted vegetated index), proposto por Huete (1988), e calculado segundo a expressão:

$$SAVI = \frac{(1 + L)(r_{p3} - r_{p4})}{(L + r_{p3} + r_{p4})} \quad (9)$$

onde L é um fator geralmente tomado igual a 0,5. No entanto, adotou-se na pesquisa um valor igual a 0,3 em virtude de ter proporcionado bons resultados, embora em estudos de balanço de energia com imagens Landsat, conduzidos por Morse et al. (2001) e Allen et al. (2002), tenha sido usado o valor 0,1.

### 1.2.6 – Obtenção das emissividades – Etapa 6

Para a obtenção da temperatura da superfície, usualmente é utilizada uma expressão que representa uma certa aproximação da equação de Planck invertida. No entanto, como cada pixel não emite, efetivamente, radiação eletromagnética como um *corpo negro*, há a necessidade de corrigir a radiância medida pela banda termal do Landsat 5 – TM, o que corresponde a introduzir a emissividade termal naquela porção do espectro eletromagnético (*narrow band* - 10,4  $\mu\text{m}$  a 12,5  $\mu\text{m}$ ) e será representada por  $\epsilon_{\text{NB}}$ . Para tanto, utilizou-se da expressão desenvolvida por Allen et al. (2002), em função do IAF, qual seja:

$$\epsilon_{\text{NB}} = 0,97 + 0,0033 \times \text{IAF} \quad (10)$$

em que IAF é o *índice de área foliar*, obtido com base nas imagens geradas nos canais 3 e 4 do Landsat 5 – TM, e a equação é válida para  $\text{IAF} < 3,0$ . Para valores do  $\text{IAF} > 3,0$ , considerou-se  $\epsilon_{\text{nb}} = 0,98$  (Allen et al., 2002).

Já a emissividade a ser considerada quando da emissão radiativa de cada pixel, representada por  $\epsilon_0$ , foi obtida segundo equação proposta por Allen et al. (2002):

$$\epsilon_0 = 0,95 + 0,01 \times \text{IAF} \quad (11)$$

válida para  $\text{IAF} < 3,0$ . Em caso contrário, assumiu-se  $\epsilon_0 = 0,98$ , procedimento usado por Morse et al. (2001) e Allen et al. (2002).

### 1.2.7 – Temperatura da superfície – Etapa 7



De posse do mapa de radiância espectral da banda termal (canal 6 do Landsat 5 – TM), obtida na Etapa 1, e da carta com a emissividade da banda termal, obtida na Etapa 6, procedeu-se à determinação da *Temperatura da superfície*,  $T_s$  (K) que foi feita segundo modelo proposto por Markham & Barker (1986), utilizado em vários estudos (Bastiaanssen, 1995; Morse et al., 2001; Allen et al., 2002, Silva et al., 2002):

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{nb}K_1}{L_{\lambda,6}} + 1\right)} \quad (12)$$

em que  $K_1 = 607,76 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ ,  $K_2 = 1260,56 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ ,  $L_{\lambda,6}$  é a radiância espectral da banda 6 obtida na Etapa 1,  $\varepsilon_{nb}$  é a emissividade de cada pixel na porção da banda termal do Landsat 5 – TM.

### 1.2.8 – Radiação de onda longa emitida – Etapa 8

A radiação de ondas longa emitida por cada pixel -  $R_{L\uparrow}$ , em  $\text{W m}^{-2}$ , foi calculada segundo (Bastiaanssen, 1995; Mose et al., 2001; Allen et al., 2002):

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_0 \times \sigma \times T_s^4 \quad (13)$$

em que  $\varepsilon_0$  e  $T_s$  representam a emissividade e a temperatura de cada pixel da imagem, e  $\sigma$  é a constante de Stefan – Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-11} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ). Valores de  $R_{L\uparrow}$  variam de 200 a  $700 \text{ W/m}^2$ , dependendo da localização e do horário da passagem do satélite na área estudada.

### 1.2.9 – Radiação de onda curta incidente – Etapa 9

A radiação de onda curta incidente -  $R_{S\downarrow}$  ( $\text{W m}^{-2}$ ) na área selecionada, foi calculada segundo equação (Bastiaanssen, 1995; Allen et al., 2002; Morde et al., 200; Silva et al., 2002):

$$R_{S\downarrow} = G_{SC} \times \cos\theta \times d_r \times \tau_{sw} \quad (14)$$

em que  $G_{sc}$  é a constante solar ( $1367 \text{ W m}^{-2}$ ),  $Z$  é o ângulo zenital solar, que é fornecido pelo cabeçalho da imagem,  $d_r$  é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol, e  $\tau_{sw}$  é a transmitância atmosférica. Os valores de  $R_{S\downarrow}$  variam de 200 a  $1100 \text{ W m}^{-2}$ , dependendo do horário e localização da imagem (Allen et al. 2002). Considerou-se que em toda a cena selecionada, por se tratar de imagem com ausência de nuvens, o valor de  $R_s$  foi constante.

### 1.2.10 – Radiação de Onda Longa Incidente – Etapa 10

A radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção da superfície,  $R_{L\downarrow}$  ( $\text{W m}^{-2}$ ) foi obtida segundo expressão (Bastiaanssen, 1995; Morse et al., 2001; Allen et al., 2002):

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a \times \sigma \times T_a^4 \quad (15)$$

em que  $\varepsilon_a$  é a emissividade atmosférica, calculada por:  $\varepsilon_a = 1.08 \times (-\ln \tau_{sw})^{0.265}$ , (Bastiaanssen, 1995),  $\sigma$  é a constante de Stefan – Boltzmann e  $T_a$  é a temperatura do ar, tomada igual a 302,9 (*Kelvin*), as dez horas da manhã. Esse valor foi obtido em Estação Meteorológica localizada no município de Petrolina, para o dia 04 de outubro de 2001. Valores de  $R_{L\downarrow}$  variam de 200 a  $500 \text{ W m}^{-2}$ , dependendo da localização e do horário da imagem (Allen et al., 2002).

### 1.2.11 – Balanço de Radiação à Superfície – Etapa 11

O Balanço de radiação à superfície –  $R_n$  foi obtido após a realização de todas as etapas prévias, que resultaram em mapas de *albedo corrigido à superfície*, de *radiação de onda longa emitida* e da *emissividade de cada pixel*. Para tanto, utilizou-se a seguinte expressão (Bastiaanssen, 995; Morse et al., 2001; Allen et al., 2002; Silva et al., 2002):

$$R_n = R_{S\downarrow}(1 - r_0) + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (16)$$

em que  $R_{S\downarrow}$  é a radiação de ondas curtas incidente em cada pixel (admitida constante em toda a área),  $r_0$  é o albedo de cada pixel corrigido,  $R_{L\downarrow}$  é a radiação de ondas longas emitida pela atmosfera na direção do pixel (também assumida constante para todos os

pixels da imagem),  $R_{L\uparrow}$  é a radiação de ondas longas emitida por cada pixel e  $\varepsilon_0$  é a emissividade de cada pixel da cena estudada.

### **Exercício de avaliação**

1. Considere-se que em dado pixel de uma imagem Landsat mediu-se a velocidade do vento ( $v = 2,2$  m/s) a 2 metros de altura ( $Z = 2$  m), durante a passagem desse satélite. Admitindo que a altura média da vegetação em torno do anemômetro é de 0,5 m, pede-se:
  - a) que seja obtida a velocidade de fricção ( $u^*$ ) no referido pixel (usar o perfil logaritmo do vento em condição de neutralidade)
  - b) a velocidade do vento no nível  $Z = 100$  m (“Bleding height”)
  - c) que seja definido o algoritmo de cômputo de  $u^*$ , e da resistência aerodinâmica ao transporte de calor (rah) em todos os pixels da imagem.
2. Com base nas informações obtidas na questão anterior e admitindo que nos pixels “quente” e “frio” da imagem  $T_q = 303$  K,  $T_f = 297$  K,  $R_{nq} = 400$   $Wm^{-2}$ ,  $R_{nf} = 670$   $Wm^{-2}$ ,  $G_q = 160$   $Wm^{-2}$ ,  $G_f = 60$   $Wm^{-2}$ ,  $h_q = 0,3$  m (altura da vegetação no pixel quente) e  $h_f = 1,3$  m (altura da vegetação no pixel frio), pede-se que seja obtida a carta de fluxo de calor sensível (H) desprezando os efeitos turbulentos na resistência aerodinâmica rah.
3. Obtenha a carta de H considerando a correção devida aos efeitos de turbulência térmica (utilize a teoria de similaridade de Monin-Obkhov).

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

Disciplina: **Introdução ao sensoriamento remoto por satélite**

Professor: **Bernardo Barbosa da Silva**

Exercícios sobre Balanço de Radiação com Landsat

1. Considere-se que em dado pixel, foram obtidos os seguintes níveis de cinza: 88, 39, 41, 121, 14, 139 e 48, referentes aos canais 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7, respectivamente, do Landsat 5 – TM, em área irrigada com pivô central em Petrolina ( altitude = 376 m). Admita que o ângulo de elevação do sol no instante da passagem do satélite na área foi de  $30,0^\circ$  e que o dia em questão foi 4 de dezembro de 2001. Com base nesses dados, obter todos os componentes do Balanço de Radiação e procedimentos de Nota de Aula distribuída.
2. Considere-se que em dois pixels de uma imagem do AVHRR-NOAA 16, foram registradas as seguintes intensidades: 153, 65, 364 e 351 e 216, 404, 233 e 245, referentes aos canais 1, 2, 4 e 5, respectivamente. Sabendo que o instante da passagem do satélite na área ocorreu às 14h00 (TSV) e que o ângulo zenital do Sol nesse instante era de  $38^\circ$  e a o dia em questão o 04 de outubro de 2001, pede-se que sejam obtidos todos os componentes do balanço de radiação, seguindo procedimentos de material distribuído e discutido em sala de aula.
3. Ainda para a questão anterior, apresente, detalhadamente, os modelos que seriam necessários para implementar o balanço de radiação com o *Model Maker* do ERDAS 8.7.

Bom trabalho.