

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
INSTITUTO DE GEOGRAFIA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOGRAFIA E GESTÃO DO TERRITÓRIO**

**USO DE DADOS DO SENSOR MODIS/AQUA E DO ALGORITMO  
SEBAL PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL NA  
BACIA DO RIO PARANAÍBA**

**ALÉCIO PERINI MARTINS**

**UBERLÂNDIA/MG  
2015**

ALÉCIO PERINI MARTINS

**USO DE DADOS DO SENSOR MODIS/AQUA E DO ALGORITMO  
SEBAL PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL NA  
BACIA DO RIO PARANAÍBA**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Uberlândia como requisito à obtenção do título de Doutor em Geografia.

**Área de concentração:** Geografia e Gestão do Território.

**Orientador:** Prof. Dr. Roberto Rosa

UBERLÂNDIA/MG  
INSTITUTO DE GEOGRAFIA  
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

M386u      Martins, Alécio Perini,  
2015          Uso de dados do sensor Modis/Agua e do algoritmo Sebal para  
               estimativa da evapotranspiração real na bacia do Rio Paranaíba / Alécio  
               Perini Martins. - 2015.  
               149 f. : il.

               Orientador: Roberto Rosa.  
               Tese (doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa  
de Pós-Graduação em Geografia.  
               Inclui bibliografia.

               1. Geografia - Teses. 2. Ciclo hidrológico - Teses. 3.  
Evapotranspiração - Rio Paranaíba (MG) - Teses. 4. Sensoriamento  
remoto - Rio Paranaíba (MG) - Teses. I. Rosa, Roberto. II. Universidade  
Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Geografia. III.  
Título.

---

CDU: 910.1

Alécio Perini Martins

**Uso de dados do sensor MODIS/AQUA e do algoritmo SEBAL para estimativa da evapotranspiração real na bacia do Rio Paranaíba**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Uberlândia como requisito à obtenção do título de Doutor em Geografia.

Área de concentração: Geografia e Gestão do Território.

Uberlândia, 21 de maio de 2015

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Roberto Rosa (Orientador) – IG/UFU

---

Prof. Dr. Edson Eyji Sano – EMBRAPA

---

Prof. Dr. Iraci Scopel – UFG/Regional Jataí

---

Prof. Dr. Jorge Luís Silva Brito – IG/UFU

---

Profa. Dra. Jussara dos Santos Rosendo –FACIP/UFU

**Data:** \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

**Resultado:** \_\_\_\_\_

## AGRADECIMENTOS

Mais uma etapa chega ao fim. Um pouco mais turbulenta, um tanto quanto complicada, mas com bons resultados. Quando ingressei no doutorado, me sentia preparado para a caminhada. Mas a gente descobre, com o passar dos meses, que nunca se está preparado. O tempo de 48 meses parece ser mais do que suficiente para quem está do lado de fora, para quem tem dedicação exclusiva à pós-graduação ou que recebe bolsa de estudos para realizar o doutorado com tranquilidade. Para quem trabalha, mora no interior de Goiás e precisa utilizar férias, madrugadas e finais de semana para cumprir créditos e desenvolver uma tese de doutorado, é um pouco mais complicado.

Agradeço à minha família de sangue, especialmente aos meus pais, Lázaro e Fátima, à minha irmã Aline e a minha avó Therezinha (*in memoriam*), pelo apoio incondicional e por compreenderem minha ausência e meu distanciamento durante esses quatro anos nos quais me desdobrei em três funções.

Agradeço à minha família de alma, meus grandes e valiosos amigos, por todo apoio nos momentos bons e ruins e, principalmente, por entenderem minhas ausências e por me fazerem rir. Obrigado Naiara, companheira de toda a vida; Júnia pelos conselhos pouco ortodoxos e pelo teto sempre disponível; Mirna, por todos os socorros durante o doutorado; Leo, companheiro de todas as horas; Isabella e Mariette, por me mostrarem que existe gente mais doida que eu nesse mundo; à “turma da Tia Elza” pelo apoio, pela descontração, pelos papos de fim de tarde; ao Talles, pelo apoio e socorro com os abstracts; e, principalmente, aos meus “geoirmãos”, amigos de mais de 10 anos que a geografia me trouxe e que o tempo não leva, Adriana, Rosi, Mariah, Matteus, Káren, Ellen, Graziella, Luana, Michelly, Lidi, Fran, Flavinha, Natália (me salvou com fotos para a tese), Maira, Maria Carol, Tia Mari, Laís, Ana Luiza, Árlei, Dani, Priscilla, Maria Paula, Baltazar e todos os outros que fizeram e fazem parte dessa caminhada.

Agradeço ao meu orientador, Roberto, pela disponibilidade e dedicação em orientar, conversar sobre os rumos da pesquisa e, principalmente, pela paciência para orientar por e-mail, em viagens corridas e com prazos apertados. É um grande privilégio poder conviver com um profissional tão ético e competente.

Agradeço a todos os professores e funcionários do PPGEU/UFU, que nunca mediram esforços para contribuir com nossa formação, tanto na parte acadêmica quanto burocrática, em especial ao João Fernandes, sempre disponível para ajudar e aos professores Washington, Jorge, Rita, Vera Salazar, Júlio, Beatriz, Marlene, Paulo César, Sílvio e Vânia Rosolen.

Agradeço aos meus colegas do curso de Geografia da UFG/Regional Jataí, que não mediram esforços para me auxiliar nesse processo, me liberando sempre que necessário para viajar até Uberlândia para disciplinas, eventos, reuniões de orientação. Faço questão de agradecer nominalmente a todos esses colegas, como o professor Washington Moragas (*in memorian*) e ao professor Iraci Scopel, meus maiores incentivadores, com quem aprendi e aprendo bastante. Aos coordenadores dos cursos de licenciatura e bacharelado em Geografia, que sempre apoiaram e compreenderam que era preciso eu me ausentar do trabalho para desenvolver minhas atividades de doutorado, professores Nelson, Evandro, Zilda, Márcio, Maria José e William. Agradeço também aos colegas de trabalho pelo incentivo, auxílio e troca de ideias e experiências nesses quatro anos, professores Dimas, Marluce, Rosana, Suzana, Cabral, Hildeu, Raquel, Jordana, Mainara, Clarissa, Mariana, Regina e Francis, e os colegas do corpo técnico do curso Winder, Carlos e Flávio. Agradeço também a todos os meus alunos, estagiários e bolsistas do Laboratório de Geoinformação pelo auxílio e compreensão.

Faço um agradecimento especial a todos os colegas do corpo técnico-administrativo da UFG/Regional Jataí, principalmente pela união e companheirismo na defesa da categoria, que não é numerosa, mas é muito forte.

Agradeço aos membros da banca examinadora por aceitarem contribuir com minha pesquisa, e a todas as outras pessoas que contribuíram, de forma direta ou indireta, com esse trabalho.

*Melhor, se arrepare: pois num chão, e com igual formato de ramos e folhas, não dá mandioca mansa, que se come comum, e a mandioca-brava, que mata? Agora, o senhor já viu uma estranhez? A mandioca doce pode de repente virar azangada - motivos não sei; às vezes se diz que é por replantada no terreno sempre, com mudas seguidas, de manaíbas - vai em amargando, de tanto em tanto, de si mesma toma peçonhas. E, ora veja: a outra, a mandioca-brava, também é que às vezes pode ficar mansa, a esmo, de se comer sem nenhum mal.*

João Guimarães Rosa

## RESUMO

Frente às intensas alterações na paisagem no último século, bem como o aperfeiçoamento de técnicas de estudo e modelos de previsão de cenários de mudanças ambientais, a geografia tem exercido papel importante por ser uma ciência que apresenta uma visão integrada dos fenômenos, permitindo que atividades de planejamento e gestão, bem como de mitigação de impactos, sejam mais eficientes. O Rio Paranaíba, cuja bacia de drenagem foi escolhida como área de aplicação do método, apresenta área aproximada de 230.000 km<sup>2</sup>, com uma diversidade de ambientes extremamente interessantes para estudos ambientais. Nesse sentido, a pesquisa teve como objetivo central avaliar a utilização de dados do sensor MODIS/AQUA para estimativa de evapotranspiração real na bacia do Rio Paranaíba. As estimativas, importantes para compreender processos que compõem o ciclo hidrológico e, consequentemente, a disponibilidade de água, foram realizadas utilizando o algoritmo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithms for Land*), desenvolvido por Bastiaanssen (1995). Este modelo utiliza princípios físicos envolvidos na reflexão, transmissão e absorção de energia pela superfície, necessitando de poucos dados coletados em campo e, portanto, permitindo o estudo de extensas áreas ou para regiões com poucos dados disponíveis ou de difícil acesso. O modelo se aplica tanto para imagens do sensor TM/Landsat quanto para imagens do sensor MODIS (TERRA ou AQUA), sendo essas últimas mais recomendadas para áreas extensas por cobrirem áreas de 10° x 10°. A partir do resultado da modelagem, nota-se que tanto o saldo de radiação à superfície, quanto os fluxos de calor estimados e a evapotranspiração real apresentam forte relação com o uso da terra e cobertura vegetal e, de forma secundária, com a variação pluviométrica sazonal, sendo os valores mais elevados identificados em imagens entre os meses de novembro e março, que correspondem ao período chuvoso na região. Quanto ao uso da terra, áreas com cobertura de vegetação densa (silvicultura e florestas), bem como os espelhos d'água das hidrelétricas apresentam valores mais elevados de evapotranspiração em todos os meses, enquanto que áreas de cerrado e pastagens não apresentaram diferenças significativas entre si. Não foi possível observar grandes diferenças nos valores registrados em áreas de agricultura irrigada e não irrigada, principalmente em decorrência da baixa resolução espacial dos produtos gerados pelas imagens MODIS/AQUA, que é de 500 metros. Uma das falhas apresentadas pelo modelo encontra-se no fato de não considerar dados específicos dos solos na estimativa de evapotranspiração, visto que os solos apresentam padrões distintos de retenção e perda de água em diferentes processos. Outro ponto falho encontra-se na estimativa do fluxo de calor sensível, que necessita de dados climáticos, em especial de velocidade dos ventos, para sua calibração. A partir da análise dos resultados e, considerando a bibliografia sobre o tema, considera-se uma confiabilidade dos dados estimados acima de 90% para a escala utilizada, que é de 1:2.000.000.

**Palavras-chave:** Algoritmo SEBAL, evapotranspiração real, sensoriamento remoto.



## ABSTRACT

Due to intense changes in the landscape over the last century, as well as the improvement of study techniques and prevision models of environmental scenarios changes, geography has played an important part for being a science that presents an integrated vision of phenomena, allowing planning and management activities, as well as the impacts mitigation efficiency. Paranaíba River, whose drainage basin was chosen as the area of the method application, presents an area of about 230.000 km<sup>2</sup>, with a diversity of extremely interesting environments for environmental studies. Therefore, this research had as the main objective evaluating the data use of MODIS/AQUA sensor to estimate the real evapotranspiration in the river basin of Rio Paranaíba. The estimates are important to understand processes that compose the hydrological cycle and, consequently, the water availability; therefore we accomplished these estimates using SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithms for Land*) algorithm, developed by Bastiaanssen (1995). This model uses physical principles involved in the reflection, transmission and absorption of energy by the surface, requiring few data collected in the field and, therefore, allowing the study of extensive areas or to regions with few data available or of difficult access. The model applies as to images of TM/Landsat sensor, as to images of MODIS (TERRA or AQUA) sensor, since the last ones are the most recommended to extensive areas due to covering areas of 10° x 10°. From the modeling results, it's possible to notice that as the radiation balance to the surface, as well as the estimated heat fluxes and the real evapotranspiration present a strong relation towards the land use and vegetation coverage and, secondarily, with the seasonal rainfall variation, with identified higher levels in images between the months of November and March, which correspond to the rainy period of the region. Regarding the land use, areas with a dense vegetation coverage (silviculture and forests), as well as the reflecting pools of hydroelectric power plants present higher levels of evapotranspiration in every month, while cerrado and pasture areas don't present significant differences between them. It wasn't possible to notice great differences in the registered values in areas of irrigated and not irrigated agriculture, mainly due to the low spatial resolution of the products generated by MODIS/AQUA images, which is 500 meters. One of the failures presented by the model is in the fact that it doesn't consider specific data of the soils in the evapotranspiration estimate, since the soils present distinguish patterns of retention and loss of water in different processes. Another failure can be found in the estimate of sensitive heat flux, which needs climatic data, specially wind speed, to its calibration. From the analysis of the results and, considering the bibliography about the theme, we can consider a reliability of the estimated data over 90% for the used scale, which is 1:2.000.000.

**Keywords:** SEBAL algorithm, real evapotranspiration, remote sensing.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Quadro 1</b> – Procedimentos em planejamento que podem ser utilizados pelos SIG	23
<b>Quadro 2.</b> Imagens MODIS/AQUA selecionadas para aplicação do modelo SEBAL na bacia do Rio Paranaíba.	55
<b>Quadro 3.</b> Informações sobre as estações convencionais do INMET utilizadas para caracterização climática da bacia do Rio Paranaíba.	79
<b>Figura 1.</b> Organograma do cálculo do saldo de radiação à superfície ( $R_n$ ).	43
<b>Figura 2.</b> Exemplo de construção de equação na ferramenta Raster Calculator da extensão Spatial Analyst Tools do ArcGIS® 10.1.	56
<b>Mapa 1.</b> Localização da área de estudo.	63
<b>Mapa 2.</b> Variação hipsométrica na Bacia do Rio Paranaíba.	65
<b>Mapa 3.</b> Principais formações geológicas encontradas na Bacia do Rio Paranaíba.	66
<b>Mapa 4.</b> Principais áreas de contribuição hidrográfica da Bacia do Rio Paranaíba	68
<b>Mapa 5.</b> Principais cursos d'água que compõem a rede hidrográfica da Bacia do Rio Paranaíba	69
<b>Mapa 6.</b> Principais grupos de solos encontrados na bacia do Rio Paranaíba	70
<b>Mapa 7.</b> Mapa clinográfico da Bacia do Rio Paranaíba	71
<b>Mapa 8.</b> Carta-imagem da Bacia do Rio Paranaíba do mês de abril de 2013	72
<b>Mapa 9.</b> Uso da Terra e Cobertura Vegetal na Bacia do Rio Paranaíba – 2013	73
<b>Mapa 10.</b> Rede de monitoramento climatológico e pluviométrico de superfície	77
<b>Mapa 11.</b> Rede de monitoramento climatológico de superfície com mais de 25 anos de dados	78
<b>Mapa 12.</b> Precipitação total anual média (em mm) na bacia do Rio Paranaíba	83
<b>Mapa 13.</b> Temperatura média anual (em °C) na bacia do Rio Paranaíba	85
<b>Mapa 14.</b> Umidade Relativa do Ar média (em %) na bacia do Rio Paranaíba	86
<b>Mapa 15.</b> Velocidade do vento média (em m/s) na bacia do Rio Paranaíba	87
<b>Mapa 16.</b> Evapotranspiração potencial média (em mm) na bacia do Rio Paranaíba	90
<b>Mapa 17.</b> Evapotranspiração real média (em mm) na bacia do Rio Paranaíba	90
<b>Mapa 18.</b> Excedente hídrico anual médio (em mm) na bacia do Rio Paranaíba	91
<b>Mapa 19.</b> Déficit hídrico anual médio (em mm) na bacia do Rio Paranaíba	92
<b>Mapa 20.</b> Distribuição espacial dos valores instantâneos de albedo na bacia do Rio Paranaíba	100
<b>Mapa 21.</b> Distribuição espacial dos valores instantâneos de índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) na bacia do Rio Paranaíba	102
<b>Mapa 22.</b> Distribuição espacial dos valores instantâneos de temperatura superficial (°C) a bacia do Rio Paranaíba (31/07/2013)	106

<b>Mapa 23.</b> Distribuição espacial dos valores instantâneos de temperatura superficial (°C) a bacia do Rio Paranaíba (02/08/2013)	107
<b>Mapa 24.</b> Distribuição espacial do saldo de radiação à superfície (W/m <sup>2</sup> ) na bacia do Rio Paranaíba (31/07/2013)	110
<b>Mapa 25.</b> Distribuição espacial do saldo de radiação à superfície (W/m <sup>2</sup> ) na bacia do Rio Paranaíba (02/08/2013)	111
<b>Mapa 26.</b> Distribuição espacial do fluxo de calor no solo (W/m <sup>2</sup> ) na bacia do Rio Paranaíba (31/07/2013)	114
<b>Mapa 27.</b> Distribuição espacial do fluxo de calor no solo (W/m <sup>2</sup> ) na bacia do Rio Paranaíba (02/08/2013)	115
<b>Mapa 28.</b> Distribuição espacial do fluxo de calor sensível (W/m <sup>2</sup> ) na bacia do Rio Paranaíba (31/07/2013)	118
<b>Mapa 29.</b> Distribuição espacial do fluxo de calor sensível (W/m <sup>2</sup> ) na bacia do Rio Paranaíba (02/08/2013)	119
<b>Mapa 30.</b> Distribuição espacial do fluxo de calor latente (W/m <sup>2</sup> ) na bacia do Rio Paranaíba (31/07/2013)	122
<b>Mapa 31.</b> Distribuição espacial do fluxo de calor latente (W/m <sup>2</sup> ) na bacia do Rio Paranaíba (02/08/2013)	123
<b>Mapa 32.</b> Distribuição espacial da evapotranspiração real instantânea (mm/h) na bacia do Rio Paranaíba (31/07/2013)	125
<b>Mapa 33.</b> Distribuição espacial da evapotranspiração real instantânea (mm/h) na bacia do Rio Paranaíba (02/08/2013)	126
<b>Mapa 34.</b> Distribuição espacial da evapotranspiração real diária (mm/dia) na bacia do Rio Paranaíba (31/07/2013)	129
<b>Mapa 35.</b> Distribuição espacial da evapotranspiração real diária (mm/dia) na bacia do Rio Paranaíba (02/08/2013)	130
<b>Foto 1.</b> Equipamentos para medição de evaporação	96
<b>Foto 2.</b> Lavoura de cana-de-açúcar no município de Ituiutaba no mês de agosto de 2013, com resposta no NDVI na faixa de 0,65	103
<b>Foto 3.</b> Lavoura de cana-de-açúcar no município de Ituiutaba/MG no mês de junho de 2013 em estágio inicial.	103
<b>Gráfico 1.</b> Variação sazonal da temperatura de superfície – TST (°C) por categoria de uso da terra na bacia do Rio Paranaíba.	108
<b>Gráfico 2.</b> Variação sazonal do fluxo de calor latente para diferentes usos das terras na bacia do Rio Paranaíba (2013)	121
<b>Gráfico 3.</b> Variação sazonal da evapotranspiração real estimada para diferentes usos das terras na bacia do Rio Paranaíba (2013)	131

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Porcentagem de área ocupada por cada categoria de uso da terra e cobertura vegetal na bacia do Rio Paranaíba.	75
<b>Tabela 2.</b> Valores médios obtidos a partir da série histórica de dados para as estações climatológicas convencionais do INMET na Bacia do Rio Paranaíba e entorno 1970/2012	84
<b>Tabela 3.</b> Valores médios obtidos a partir do balanço hídrico do solo da série histórica de dados para as estações climatológicas convencionais do INMET na Bacia do Rio Paranaíba e entorno 1970/2011.	89
<b>Tabela 4.</b> Valores médios de albedo de superfície (-) por categoria de uso da terra e cobertura vegetal	99
<b>Tabela 5.</b> Valores médios de NDVI (-) por categoria de uso da terra e cobertura vegetal	104
<b>Tabela 6.</b> Valores médios temperatura de superfície – TST (°C) por categoria de uso da terra e cobertura vegetal	105
<b>Tabela 7.</b> Valores médios do saldo final de radiação à superfície (W/m <sup>2</sup> ) por categoria de uso da terra e cobertura vegetal	109
<b>Tabela 8.</b> Valores médios do fluxo de calor no solo (W/m <sup>2</sup> ) por categoria de uso da terra e cobertura vegetal	113
<b>Tabela 9.</b> Valores médios do fluxo de calor sensível (W/m <sup>2</sup> ) por categoria de uso da terra e cobertura vegetal	117
<b>Tabela 10.</b> Valores médios do fluxo de calor latente (W/m <sup>2</sup> ) por categoria de uso da terra e cobertura vegetal	120
<b>Tabela 11.</b> Valores médios de evapotranspiração instantânea (mm/h) por categoria de uso da terra e cobertura vegetal	124
<b>Tabela 12.</b> Valores médios de evapotranspiração real diária (mm/dia) por categoria de uso da terra e cobertura vegetal	128
<b>Tabela 13.</b> Comparativo entre os valores médios de evapotranspiração real estimados via SEBAL (mm/dia) e os dados de evapotranspiração de referência (ET <sub>o</sub> ) calculados de acordo com a metodologia da FAO a partir de dados climatológicos	132

## LISTA DE EQUAÇÕES

1. Balanço de energia na Terra	26
2. Balanço de energia para áreas continentais	26
3. Saldo de Radiação à superfície	32
4. Evapotranspiração	35
5. Cálculo de albedo de superfície	44
6. Radiação de onda curta incidente	44
7. Transmissividade atmosférica	44
8. Radiação de onda longa emitida pela superfície	44
9. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)	45
10. Índice de Vegetação Ajustada ao Solo (SAVI)	45
11. Índice de Área Foliar (LAI)	46
12. Emissividade de superfície	46
13. Radiação de onda longa incidente	47
14. Emissividade da atmosfera	47
15. Saldo de radiação à superfície (compartimentado)	48
16. Fluxo de calor no solo	48
17. Fluxo de calor sensível	48
18. Fluxo de calor sensível (simplificada)	49
19. Diferença de temperatura (dT) no pixel quente	49
20. Resistência aerodinâmica do ar	50
21. Velocidade do vento	50
22. Coeficiente de rugosidade do terreno	50
23. Coeficiente de rugosidade do terreno de acordo com o SAVI	50
24. Velocidade do vento a 200m de altura	50
25. Fluxo de calor latente	51
26. Evapotranspiração horária	51
27. Calor latente de evaporação	51
28. Fração evaporativa	51
29. Evapotranspiração de referência	52
30. Evapotranspiração diária	52
31. Evapotranspiração sazonal	53

## LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

ANA – Agência Nacional de Águas

AVHRR – Advanced Very High Resolution Radiometer

CBERS – Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres

$\theta$  – Ângulo de Incidência Solar

CPRM – Serviço Geológico do Brasil

$C_p$  – Calor específico do ar

$d_r$  – Inverso do quadrado da distância terra-sol

$dT$  – Diferença de temperatura do ar

$\epsilon_0$  – Emissividade de superfície

$\epsilon_a$  – Emissividade atmosférica

EOS – Earth Observing System

ET24 – Evapotranspiração diária

ET<sub>h</sub> – Evapotranspiração horária

ET<sub>r</sub> – Evapotranspiração Real

ET<sub>rF</sub> – Evapotranspiração de referência

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations

G – Fluxo de calor no solo

$G_{sc}$  – Constante solar

GSFC – Goddard Space Flight Center

H – Fluxo de calor sensível

HDF - Hierarchy Data Format

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

K – Constante de Von Karman

$K_c$  – Coeficiente de cultura

L - Radiância

LAI – Índice de Área Foliar

LE – Fluxo de calor latente

MMA – Ministério do Meio Ambiente

MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

MRT – Modis Reprojection Tool

NASA – America's Space Agency

NDVI – Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration

Rah – Resistência aerodinâmica ao transporte de calor

REM – Radiação eletromagnética

$R_L\uparrow$  - Radiação de onda longa emitida pela superfície

$R_L\downarrow$  - Radiação de onda longa incidente

$R_N$  – Saldo de radiação à superfície

$R_S\downarrow$  - Radiação de onda curta incidente

SAVI – Índice de Vegetação Ajustado ao Solo

SEBAL – Surface Energy Balance Algorithms for Land

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SRTM – Shuttle Radar Topography Mission

TIF – Tagged Image File Format

TST – Temperatura Superfície Terrestre

$T_{sw}$  – Transmissividade atmosférica

U – Velocidade do vento

USGS – United States Geological Survey

$U_x$  – Velocidade de atrito do vento

Zom – Coeficiente de Rugosidade da Superfície

$\alpha$  – Albedo de superfície

$\lambda$  – Calor latente de evaporação

$\Lambda$  – Fração evaporativa

$\rho$  – Densidade do ar

$\sigma$  – Constante de Stefan-Boltzmann

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	15
1. GEOTECNOLOGIAS E APLICAÇÕES EM MONITORAMENTO DE SUPERFÍCIE.	20
2. ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO UTILIZANDO O ALGORITMO SEBAL	38
2.1 INSTRUMENTAÇÃO E PROCEDIMENTOS	41
3. ANÁLISE AMBIENTAL INTEGRADA DA BACIA DO RIO PARANAÍBA	59
4. ANÁLISE DA VARIAÇÃO ESPACIAL E SAZONAL DOS ELEMENTOS DO CLIMA NA BACIA DO RIO PARANAÍBA (1970/2012)	76
5. APLICAÇÃO DO ALGORITMO SEBAL E DE IMAGENS MODIS/AQUA PARA MAPEAMENTO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL NA BACIA DO RIO PARANAÍBA – APLICAÇÃO E ANÁLISE DO MODELO.	94
CONSIDERAÇÕES FINAIS.	135
REFERÊNCIAS	141



## INTRODUÇÃO

No decorrer dos anos, a sociedade tem demandado cada vez mais recursos naturais para sustentar seu sistema produtivo, essencialmente a água. Atualmente, mais de 7 bilhões de pessoas, exercendo suas mais variadas atividades econômicas e cotidianas, provocam extraordinária pressão sobre os sistemas naturais.

Neste contexto, os recursos hídricos aparecem como o início desse ciclo evolutivo e, na maioria dos casos, como o destino final de boa parte dos resíduos gerados por essas atividades. Além disso, mudanças bruscas nas relações de uso e ocupação das terras, em especial pela supressão de florestas, e a ocupação desordenada de fundos de vales e áreas de recarga de aquíferos, entre outros, interferem diretamente no ciclo hidrológico, reduzindo a capacidade do sistema de “produzir” água e, conseqüentemente, a oferta deste recurso.

Mesmo com 77% de sua superfície coberta por água, nem todas as regiões da Terra dispõem desse recurso em quantidade e qualidade suficientes para oferecer condições dignas de sobrevivência às sociedades humanas e às plantas e aos animais. Na obra “Atlas da Água”, os autores Clarke e King (2005) apontam que 67% da superfície terrestre apresenta fontes hídricas insuficientes, escassas ou no limite, considerando as necessidades da população local. Segundo a FAO, em 2050, a escassez de água afetará dois terços da população mundial, principalmente devido ao uso excessivo de recursos hídricos para a produção de alimentos.

O crescimento desordenado dos centros urbanos e a intensa atividade industrial contribuem de forma direta com o agravamento da atual situação, porém, sem dúvida, a maior pressão sobre os recursos hídricos, que interferem diretamente na produção e oferta de água às diferentes atividades humanas, é exercida pelas práticas agropecuárias.

Segundo o Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paranaíba (ANA, 2013), área escolhida para este estudo, 74,8% da vazão retirada nos afluentes da bacia é destinado à irrigação e, se considerar o consumo, esse percentual é de 89,5%, enquanto que o consumo humano é responsável por apenas 2,9% dessa fatia.

Além dos cálculos relativos ao consumo e da relação chuva/vazão, é importante estudar e encontrar formas de estimar com maior exatidão as perdas e entradas de água no sistema por meio de outros componentes do ciclo hidrológico, entre eles, a evapotranspiração, que define a perda total de água do sistema solo-planta para a atmosfera. Essas perdas podem retornar ao sistema em forma de precipitação e são importantes para a dinâmica climática regional. Um

exemplo clássico dessa relação pode ser observado na Floresta Amazônica, responsável por parte da umidade que provoca precipitações no centro-sul do Brasil, proveniente da evapotranspiração na imensa área coberta pela floresta equatorial. Mudanças nos padrões de uso da terra e cobertura vegetal, provocam também mudanças no albedo e na temperatura de superfície, variáveis que definem o balanço de energia na superfície e, conseqüentemente, os fluxos de calor no solo, evapotranspiração e precipitação.

Dessa forma, diversos estudos na área de meteorologia, climatologia e mudanças climáticas têm procurado avaliar essas relações entre mudanças no uso da terra, desmatamento e alterações nos padrões de evapotranspiração e, conseqüentemente, na dinâmica pluviométrica. Recentemente, foi veiculado um estudo da Agência Espacial Americana (NASA) que aponta o ano de 2014 como o mais quente desde quando essas informações começaram a ser registradas. No Brasil, dados climáticos apontam que, mesmo sem a influência do El Niño, as chuvas ficaram muito abaixo da média, o que fez com que reservatórios do centro-sul do país chegassem a níveis extremos, deixando milhões de pessoas sob risco de racionamento. Esses sinais também podem ser visualizados em imagens termais obtidas por sensoriamento remoto, que apontam temperaturas de superfície superiores a 45 graus em áreas urbanas e regiões agrícolas com solo descoberto.

Frente às intensas alterações na paisagem, em especial a partir do século XX, bem como o aperfeiçoamento de técnicas de estudo e modelos de previsão de cenários de mudanças ambientais, a geografia tem exercido papel importante por ser uma ciência que apresenta uma visão ampla dos fenômenos, permitindo que atividades de planejamento e gestão, bem como de mitigação de impactos, sejam mais eficientes, especialmente ao utilizar ferramentas de análise espacial como imagens de sensoriamento remoto e sistemas de informação geográficas.

A velocidade de evolução das geotecnologias exige um crescente investimento na área de Tecnologias da Informação, principalmente no que diz respeito à aquisição e adaptação de softwares, bem como imagens de satélite e instrumentos de monitoramento. Nesse sentido, a pesquisa que deu origem a essa tese de doutorado teve como objetivo central avaliar a utilização de dados do sensor MODIS/AQUA para estimar valores de evapotranspiração real em superfície na bacia do Rio Paranaíba. Acessoriamente, foi necessário estimar outras variáveis como uso da terra, índice de vegetação, albedo, temperatura de superfície, saldo de radiação e fluxos de calor para, então, estimar os valores de evapotranspiração utilizando imagens de sensoriamento remoto e ferramentas de geoprocessamento.

Entre os objetivos específicos, pretendeu-se: a) avaliar a aplicabilidade das imagens do sensor MODIS/AQUA para estimativa da evapotranspiração real na superfície; b) testar o modelo SEBAL, originalmente desenvolvido para áreas temperadas e para imagens TM/Landsat, para imagens MODIS/AQUA e para áreas de clima tropical, coberta originalmente por savanas; c) Analisar a variação sazonal e espacial de elementos como temperatura, precipitação e umidade relativa do ar e dados de evapotranspiração, excedente e déficit hídrico na bacia do Rio Paranaíba obtidos em estações climatológicas convencionais; d) Analisar a relação entre diferentes categorias de uso da terra e cobertura vegetal e a variação espacial de elementos como saldo de radiação, fluxos de calor e evapotranspiração.

As estimativas foram realizadas utilizando o algoritmo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithms for Land*), desenvolvido por Bastiaanssen (1995), a partir de princípios físicos envolvidos na reflexão, transmissão e absorção de energia pela superfície, necessitando de poucos dados coletados em campo e, portanto, permitindo o estudo de extensas áreas ou para regiões com poucos dados disponíveis ou de difícil acesso. O modelo se aplica tanto para imagens do sensor TM/Landsat quanto para imagens do sensor MODIS (TERRA ou AQUA), sendo essas últimas mais recomendadas para áreas extensas por cobrirem áreas de 10° x 10°, aproximadamente.

Inicialmente, foram utilizadas imagens do sensor MODIS a bordo da plataforma TERRA, porém foram obtidos melhores resultados com imagens do sensor MODIS da plataforma AQUA, cujo horário de passagem sobre a região coincide com o período do dia no qual os processos mapeados são mais intensos (por volta de 14:30h).

O Rio Paranaíba, um dos principais formadores da Bacia do Rio Paraná, apresenta bacia de drenagem com área aproximada de 230.000 km<sup>2</sup>, com uma diversidade de ambientes extremamente interessantes para estudos ambientais, permitindo que a caracterização e análise da dinâmica destes ambientes possam ser realizadas com o uso de sensoriamento remoto e geoprocessamento. Como exemplo, destacam-se os diferentes usos da terra identificados, que apresentam comportamentos distintos em relação à variação sazonal dos índices de vegetação, temperatura de superfície, fluxo de calor no solo e evapotranspiração.

A principal hipótese que pretende-se comprovar com a pesquisa é de que elementos como temperatura de superfície, saldo de radiação, fluxos de calor e evapotranspiração encontram-se intrinsecamente relacionados aos padrões de uso da terra e cobertura vegetal e que, as alterações nessas categorias durante a ocupação da região têm modificado esses índices,

podendo interferir na distribuição regional de chuvas, aumento na temperatura média e alterações nas temperaturas máximas e mínimas.

Uma das principais dificuldades nesse tipo de estudo encontra-se na escassez de dados climáticos e outros estudos para comparação de resultados, visto que essas técnicas ainda são pouco utilizadas na região de interesse. Na área da Bacia do Rio Paranaíba e no entorno próximo existem apenas 25 estações climatológicas convencionais para cobrir uma área de aproximadamente 230.000Km<sup>2</sup> e, se considerarmos apenas as estações localizadas dentro dos limites da bacia, esse número é de apenas 12. Dessa forma, fica muito complicado comparar dados obtidos em superfície, como temperatura e evapotranspiração, a dados obtidos nestas estações por termômetros e evaporímetros, não permitindo estabelecer uma correlação confiável entre as variáveis. Apesar de existirem inúmeras outras estações pertencentes a outras entidades, são necessários no mínimo 25 anos de dados para uma análise climática mais precisa, universo de dados que poucas estações dispõem.

Nesse sentido, o uso de modelos matemáticos, elaborados para extrair informações de imagens de satélite e dados coletados em superfície, mesmo que pontualmente e com distribuição espacial insuficiente, se mostram como alternativa interessante para realizar estudos e monitoramentos em áreas com grande extensão territorial, de difícil acesso e/ou com escassez de informações coletadas em estações ou postos de observação.

No intuito de atingir os objetivos propostos e comprovar as hipóteses da pesquisa, os resultados do desenvolvimento da tese foram organizados em 5 seções, sendo que a primeira aborda especificamente questões teóricas sobre o uso de imagens de sensoriamento remoto e técnicas de geoprocessamento para monitoramento de superfície. A segunda seção traz a descrição dos procedimentos do modelo utilizado, evidenciando as etapas e o sistema organizacional do algoritmo SEBAL, desde a obtenção e tratamento das imagens MODIS/AQUA até a estimativa da evapotranspiração diária, passando por cálculos de albedo, índice de vegetação, temperatura de superfície, balanço de radiação e fluxos de calor, entre outros, obtidos por matemática de bandas no SIG ArcGIS 10.1®.

As seções 3 e 4 apresentam dados gerais sobre a área de estudo, representada pela Bacia do Rio Paranaíba, que drena partes dos territórios do Distrito Federal e dos estados de Goiás, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul. No item 3, analisou-se de forma integrada os elementos do meio físico, assim como suas relações com o uso da terra e a cobertura vegetal a partir da metodologia da avaliação ambiental integrada (TUCCI e MENDES, 2006), importante para compreender a variação espacial dos elementos considerados na modelagem. No item 4 foi

elaborado um mapeamento climatológico por interpolação dos dados obtidos junto às estações convencionais do INMET (séries históricas) na tentativa de caracterizar e compreender o clima regional e o comportamento espacial e sazonal de suas variáveis.

A seção 5 apresenta os resultados da modelagem para estimativa de evapotranspiração, especificamente a aplicação do modelo, a calibração e a comparação dos resultados do mapeamento às categorias de uso da terra e cobertura vegetal. Para a aplicação, foram escolhidas duas imagens do ano de 2013 que apresentavam 0% de cobertura de nuvens e, portanto, sem maiores interferências atmosféricas. Posteriormente, foram realizados mapeamentos para uma imagem de cada mês do ano de 2013, verificando-se a variação sazonal.

## 1. GEOTECNOLOGIAS E APLICAÇÕES EM MONITORAMENTO DE SUPERFÍCIE.

O monitoramento de diferentes elementos do clima tem se tornado indispensável para avaliar o comportamento destes na dinâmica climática, bem como subsidiar atividades de planejamento, avaliação e gestão dos recursos ambientais. A corrida espacial e a descoberta e aperfeiçoamento de novas tecnologias têm difundido a utilização do sensoriamento remoto e de sistemas de informação geográfica (SIG's) que, por sua vez, provocam um ganho em rapidez e em disponibilização de informações. Atualmente, alguns satélites que coletam dados meteorológicos, por exemplo, produzem dados horários com transmissão em tempo real.

Ehlers (2007, p.19) argumenta que, nos últimos anos, o número de sistemas de sensoriamento remoto, “que podem fornecer aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), famintos por dados, informações atuais e sinópticas, vem aumentando significativamente” e, que a integração em SIGs “permite o armazenamento e gerenciamento eficiente desses dados como parte do conjunto total das geoinformações disponíveis e registradas”.

A grande questão que envolve o uso dessas imagens ainda reside em seu alto custo, visto que não é possível adquirir imagens de satélite de alta resolução gratuitamente, ou com custos reduzidos. Ao abordar esta questão, Ehlers (2007, p.19) expõe que “é um despropósito supor que a construção de um sistema de satélite se justifica comercialmente. Sem programas de fomento públicos nacionais e internacionais, nenhum satélite jamais teria sido lançado”. Nesse sentido, a iniciativa do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) de disponibilizar gratuitamente as imagens dos satélites CBERS merece destaque, visto que a missão só foi possível com o uso de recursos públicos.

Ehlers vai ainda mais fundo nessa questão ao afirmar que

É também um fato que as empresas de comercialização de programas de satélite são financiadas essencialmente por clientes públicos, para executar tarefas em conformidade com o bem-estar público. A partir disso, pode-se argumentar se o sensoriamento remoto por satélite não é uma tarefa pública, financiada pelas instituições correspondentes e que deveria ser disponibilizada, a baixo custo, para as respectivas tarefas. Enquanto programas de monitoramento representam somente um comprovante de concepção (*proof-of-concept*) ou que têm como ferramenta básica dados de satélite de baixa resolução, como aqueles do AVHRR ou do METEOSAT, não se pode falar de uma operacionalidade visando a uma utilização auto-sustentável. (EHLERS, 2007 p.20).

Atualmente, o INPE, assim como outros órgãos públicos, disponibiliza imagens de média e baixa resolução gratuitamente (Landsat, CBERS, ResourceSat, Terra e Aqua), o que tem permitido ganhos qualitativos e quantitativos em pesquisas e atividades de monitoramento e gestão instrumentados por Sensoriamento Remoto. No campo do Geoprocessamento, é cada vez mais comum o uso de Sistemas de Informação Geográfica gratuitos (softwares livres) que apresentam diversas ferramentas de classificação, interpolação e espacialização, fundamentais ao tratamento e análise de informações climáticas de superfície.

Abordando especificamente a questão do uso de imagens de sensoriamento remoto para análise e monitoramento ambiental, Blaschke, Glässer e Lang (2007, p.17) afirmam que este potencial pode ser avaliado seguindo alguns critérios:

- Possibilidade de objetividade permitindo uma grande independência do técnico-intérprete;
- A largura da faixa de possíveis erros de método (ou desvios de foco devidos à metodologia);
- Volume de trabalho: além do volume temporal, as exigências para com o técnico-intérprete são elevadas [...];
- Redução do trabalho de campo: espaços naturais difíceis, como por exemplo áreas de altas montanhas, alguns métodos já foram praticamente eliminados e outros estão sendo combinados com grande esforço;
- “Capacidade de associação” com outros planos de informação em SIG: com relação à “estruturação modular” do programa de monitoramento, dá-se preferência a métodos que permitam interfaces com outras pesquisas constantes (estruturação qualitativa, estrutura vertical e distribuição espacial).
- Padronização, opção de intercâmbio de métodos, condição de uso em longo prazo e
- O potencial de desenvolvimento.

Integrante do pacote conhecido como geotecnologias, o geoprocessamento tem se mostrado instrumento fundamental a atividades de diagnóstico, análise, planejamento e gestão ambiental, permitindo a visualização e a distribuição espacial de fenômenos geográficos, tanto físicos quanto sociais, facilitando a tomada de decisões por qualquer agente que se interesse pelo uso e ocupação do espaço.

Na perspectiva do geoprocessamento, Santos, Carvalhais e Pires (1997) consideram que os planejamentos ambientais são elaborados como sistemas estruturados que envolvem as etapas de: a) definição dos objetivos; b) diagnóstico; c) prognóstico e identificação de alternativas; d) tomada de decisão; e e) formulação de diretrizes, metas e políticas. Em todas essas etapas, a interação com Sistemas de Informações Geográficas possibilita um dinamismo maior ao processo.

Câmara, Davis e Monteiro (2001, p.2), destacam que Geoprocessamento constitui “uma tecnologia interdisciplinar, que permite a convergência de diferentes disciplinas científicas para o estudo de fenômenos ambientais e urbanos”. Tem sido bastante utilizado em análise ambiental por permitir a coleta, armazenamento, tratamento e análise da informação espacial, bem como o uso integrado com outras tecnologias, permitindo trabalhar áreas extensas e integrar diversas variáveis, com ganho de tempo e qualidade.

Destacam-se desse conjunto que compõe o geoprocessamento os Sistemas de Informações Geográficas (SIG), pois representam nos dias atuais excelente instrumental técnico, indispensáveis para o planejamento e gestão do espaço. As comparações, análises, correlações, sobreposição de informações antes realizadas por meio analógico passam a ser automatizadas e seguindo rigorosos processos estatístico-matemáticos-computacionais, dependendo dos objetivos propostos, utilizando, de forma integrada, informações espaciais e não-espaciais.

No campo dos estudos ambientais e socioeconômicos, tem-se um interessante uso destas tecnologias. Santos, Carvalhais e Pires (1997), com base num levantamento bibliográfico, organizaram um quadro que aponta as possibilidades de utilização dos SIG's para o planejamento ambiental que também auxiliam nos processos de gestão de bacias hidrográficas (Quadro 1).

O uso de Sistemas de Informação Geográfica no diagnóstico, gestão e análise ambiental em bacias hidrográficas é indicado, entre outras funções, por permitir a geração de Modelos Digitais do Terreno (MDT) para a extração de bordas, topos, curvas de nível, extração de drenagem etc., que, em conjunto com mapas de solos, geologia, geomorfologia, precipitação, temperatura, evapotranspiração, entre outros, permitem a análise integrada das diversas características ambientais da área.

A bacia hidrográfica possui um recorte de análise em que podem ser trabalhadas e representadas as informações espaciais e suas interações. A utilização do geoprocessamento e de imagens de sensoriamento remoto facilitam a integração e inter-relação de informações inclusive as socioeconômicas.

Câmara, Davis e Monteiro (2001) consideram que os estudos ambientais podem conter o mapeamento temático que visa caracterizar e entender a organização do espaço; o diagnóstico serve de base para estudos mais específicos sobre determinadas áreas para diferentes tipos de ocupação ou preservação; a avaliação ambiental busca monitorar as características ambientais



e a contribuição da participação humana; o ordenamento territorial, em qualquer nível ou setor, serve para estabelecer normas de uso e ocupação de determinadas áreas.

**Quadro 1** – Procedimentos em planejamentos que podem ser utilizados pelos SIG.

<b>Procedimentos em planejamento</b>	<b>Exemplos de funções atribuídas ao SIG(1)</b>
Avaliar os elementos que compõem o meio	Apresentar dados temáticos de forma espacial; Representar e gerar classificações de florestas; Expressar, espacialmente, processos físicos, biológicos e populacionais; Definir estabilidade de encostas.
Analisar fatos dentro de uma abrangência temporal	Representar a história da dinâmica do uso da terra; Avaliar a dinâmica histórica regional; Avaliar causas e conseqüências históricas de desmatamentos; Representar a evolução ou expansão agrícola; Mapear as perdas territoriais de tipos de produção.
Relacionar os fatos	Mapear vocações territoriais e impactos ambientais temporais; Cruzar informações politemáticas, com produção de mapas síntese; Avaliar a dinâmica do uso da terra em relação a declividade e altitude; Interpretar áreas de plantio em relação ao clima, solo e declividade.
Elaborar prognósticos	Determinar possíveis causas de impacto e prever futuras conseqüências ambientais; Medir e inferir sobre a qualidade dos recursos naturais; Definir cenários futuros
Definir zonas ou territórios	Zonear territórios de acordo com regras pré-estabelecidas; Identificar áreas de proteção, de refúgios ou <i>habitat</i> exclusivos; Definir de áreas de visão aprazível para lazer; Planejar rotas ou percursos adequados dentro de uma região.
Elaborar alternativas de ação	Apresentar alternativas mitigadoras ou de resolução de conflitos; Elaborar planos de reflorestamento; Obter alternativas para manejo de recursos, como o manejo de vegetação considerando-se atributos estruturais das florestas relacionados a outros mapas; Monitorar o ambiente, como controle do fogo ou propagação de desertificação

**Fonte:** Santos, Carvalhais e Pires (1997:3) (1) conforme bibliografia pesquisada pelos autores. Quadro modificado

**Organização:** MARTINS, Alécio Perini, 2014.

O monitoramento de superfície, relacionado à observação continuada das condições do tempo vem, a cada dia, sendo substituído por dados obtidos por satélites, cada vez mais especializados na coleta de dados climáticos. Além de permitir uma cobertura maior, esses satélites possibilitam a obtenção de uma maior quantidade de dados em intervalos de tempo menores.

Rees (2001) define o Sensoriamento Remoto, de forma genérica, como a coleção de informações sobre um objeto sem necessidade de contato físico com ele.

A aquisição de imagens por Detecção Remota (DR) baseia-se no fato de os objetos da superfície terrestre refletirem radiação eletromagnética (REM) proveniente do Sol. É possível inferir das características físicas e químicas dos objetos à superfície da Terra através da REM proveniente desses objetos e registrada por sensores a bordo de satélites artificiais da Terra, designados satélites de Detecção Remota. Além da radiação refletida, os objetos emitem radiação própria, com intensidade e composição espectral dependente da temperatura, que também é usada em detecção remota. (FONSECA e FERNANDES, 2004 p.01)

Cada objeto presente na superfície terrestre que recebe a energia eletromagnética proveniente do sol, responde de uma forma a esse processo, absorvendo parte dessa energia e transformando em calor, e devolvendo parte dessa energia por reflexão. Dessa forma,

após a interação com os objetos e feições naturais da superfície do terreno, a energia refletida ou emitida por eles pode ser registrada por um sensor localizado remotamente. [...] Esta informação pode ser demonstrada por um gráfico, em forma de curva. Objetos específicos determinam curvas características denominadas *padrão de resposta espectral* ou *assinatura espectral*. Dependendo da época do ano e da forma de coleta dos dados, as curvas podem apresentar variações. Essas variações limitam-se a uma amplitude em que se percebe a manutenção do padrão da curva, os objetos definem um comportamento espectral próprio que depende da sua constituição. (LUCHIARI, KAWAKUBO e MORATO, 2005, p.36-37)

O sensoriamento remoto tem origem no Século IV a.C. com a câmera obscura de Aristóteles, mas os avanços mais significativos ocorrem apenas no século XVII com a criação e desenvolvimento de lentes e, no século XIX com a invenção da fotografia. Ainda durante o século XIX, as formas de radiação eletromagnética foram descobertas além da faixa visível do espectro: a radiação infravermelha por Herschel, a ultravioleta por Ritter e as ondas de rádio por Hertz; em 1863, Maxwell desenvolveu a teoria eletromagnética da qual depende a nossa compreensão da maioria destes fenômenos (REES, 2001, p. 1-2)

Novo (2008) destaca que o Manual of Remote Sensing ASP (1975, 1983) divide a história do sensoriamento remoto em dois períodos. No primeiro período, da invenção da fotografia até a década de 1960, o sensoriamento remoto era baseado na utilização de fotografias aéreas que, no Brasil, originaram toda a cartografia de base do país (cartas topográficas do serviço cartográfico do exército brasileiro). O segundo momento, após a década de 1960, é caracterizado pela multiplicidade de sistemas sensores, iniciado pelo lançamento do SPUTNIK I pela então União Soviética, iniciando a corrida espacial e proporcionando um rápido desenvolvimento destas tecnologias que, hoje, são aplicadas nas mais diversas áreas do conhecimento.

Na realidade, a partir da década de 1990, houve algumas mudanças de paradigmas na aquisição de dados de sensoriamento. Não houve apenas avanços na tecnologia de construção de sensores que ficaram mais sensíveis, houve avanços também na capacidade de transmissão, armazenamento e processamento graças aos avanços das telecomunicações e da informática. Com isso, muitas missões passaram a ter cargas úteis complexas, como é o caso das plataformas do programa Earth Observation System (EOS) da National Aeronautics and Space Administration (NASA). (NOVO, 2008, p.04)

Basicamente, os sensores remotos trabalham com o balanço entre a principal fonte de energia que atinge a superfície terrestre – a radiação solar – e os padrões de reflectância dos diferentes objetos na superfície. De acordo com Ayoade (2010), o sol fornece 99.97% da energia que é utilizada no sistema terra-atmosfera, emitindo energia em ondas eletromagnéticas que se propagam à razão de 299.300 km/s.

Para o Sol, o comprimento de onda de máxima emissão é aproximadamente 0,5 micron (0,5 $\mu$ ). Quase 99% da radiação solar é de curto comprimento de onda, de 0,15 a 4,0  $\mu$ m. Segundo Sellers (1965), uma classificação da composição espectral da radiação solar indica que 9% é ultravioleta ( $\lambda \leq 0,4 \mu$ m), 45% está na faixa do visível ( $0,4 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 0,74 \mu\text{m}$ ), enquanto que os 46% restantes são infravermelhos ( $\lambda > 0,74 \mu\text{m}$ ). (AYOADE, 2010, p. 25)

Quando aquecida pela radiação solar, a superfície terrestre também se torna uma fonte de radiação de ondas longas ao refletir a energia recebida e emitir calor. “A maior parte da radiação emitida pela Terra está na faixa espectral infravermelha de 4  $\mu$ m até 100  $\mu$ m” (AYOADE, 2010, p.33).

Tendo em vista a curva de emissão do Sol, podemos considerar que, para comprimentos de onda entre 0,4  $\mu$ m e 2,5  $\mu$ m, a energia utilizada para o Sensoriamento Remoto dos recursos terrestres é o fluxo solar refletido e, para comprimentos de onda maiores que 6  $\mu$ m, a energia utilizada para o Sensoriamento Remoto dos recursos terrestres é o fluxo termal emitido pela superfície terrestre (NOVO, 2008, p.21)

A atmosfera, assim como a superfície terrestre, absorve e emite energia radiante, com alta capacidade de absorção de radiação infravermelha principalmente pela ação do vapor d’água, das nuvens, do ozônio e do bióxido de carbono (AYOADE, 2010).

Enquanto a atmosfera absorve somente 24% da radiação solar que atinge a Terra, que é de ondas curtas, somente 9% da radiação terrestre infravermelha é liberada diretamente no espaço, principalmente através da chamada janela atmosférica, constituída de comprimentos de onda na faixa de 8,5  $\mu$ m – 11,0  $\mu$ m. Os 91% restantes são absorvidos pela atmosfera. (AYOADE, 2010, p.35)

Esses princípios envolvendo energia solar, energia terrestre e energia atmosférica compõem o balanço de radiação, entendido como a diferença entre a quantidade de radiação que é absorvida e emitida por uma superfície. Já o balanço de energia terrestre relaciona o fluxo de radiação líquida à transferência de calor latente e de calor sensível, entre outros. Esse balanço vai determinar, por exemplo, a quantidade de calor retida na atmosfera (temperatura do ar), a pressão atmosférica, a dinâmica das massas de ar, as precipitações, a evapotranspiração, entre outros elementos climatológicos que o avanço do sensoriamento remoto permite estudar com mais precisão e dinamicidade. O balanço de energia na terra é dado pela equação 1 (AYOADE, 2010, p.39)

$$R = LE + H + G + \Delta f + P \quad (1)$$

Onde R é o balanço de radiação ou radiação líquida, LE é o calor latente da evaporação, H é o calor sensível (todos medidos em W/m<sup>2</sup>),  $\Delta f$  é a advecção horizontal de valor pelas correntes (desprezível sobre superfícies continentais), G é o calor transferido para dentro ou para fora da armazenagem e P é a energia usada para a fotossíntese (cerca de 5% da radiação líquida). Para áreas continentais, a equação pode ser simplificada (2).

$$R = LE + H \quad (2)$$

Além de sua importância para a compreensão de base da dinâmica climática terrestre, o conhecimento dos padrões de radiação e reflexão são importantes para a compreensão, tratamento e leitura de imagens de satélite. Assim, alguns objetos apresentam uma melhor resposta espectral em comprimentos de onda correspondente à faixa de cores visíveis, outros no infravermelho, o que faz com que o usuário de imagens de sensores remotos tenha que ter um certo cuidado ao escolher quais serão utilizados em mapeamentos específicos. Por exemplo, é possível identificar e mapear alguns tipos de solos por sensoriamento remoto, mas apenas com o uso de imagens infravermelhas. Já alguns parâmetros de qualidade de água em reservatórios, como transparência, clorofila e sedimentos, devem ser estudados a partir do uso de imagens obtidas na faixa espectral visível.

Para compreender essas relações decorrentes do balanço de energia, é preciso delimitar alguns conceitos importantes em Sensoriamento Remoto. Inicialmente, conceituam-se duas grandezas radiométricas que expressam a densidade do fluxo radiante em uma superfície: a irradiância (E), que corresponde ao fluxo radiante que incide sobre a superfície e a excitância radiante (M), que corresponde ao fluxo emitido pela superfície (NOVO, 2008, p.23).

A radiância (L) grandeza fundamental para a compreensão do funcionamento dos sistemas sensores, constitui “a quantidade de radiação que deixa determinada superfície por unidade de área em uma direção de medida” (ROSA, 2009, p.33) A radiância dos objetos é medida pelos sistemas de sensoriamento remoto, sendo que, para cada elemento na superfície, a informação registrada por cada banda espectral é proporcional à radiância desse elemento ( $W/m^2$ ).

A emissividade pode ser definida como “a razão entre a excitância de um material e a excitância de um corpo negro a mesma temperatura” (NOVO, 2008, p.28) e constitui uma grandeza importante em mapeamentos climatológicos de superfície por trabalhar com dados de sensoriamento remoto na região do infravermelho termal.

A fração do fluxo incidente que é refletido pela superfície do objeto, expressa a reflectância do objeto. A fração do fluxo incidente que é absorvida pelo objeto expressa a sua absortância. As frações de energia transmitida, refletida e absorvida pelos objetos variam com as suas propriedades físico-químicas, estrutura e posição em relação à fonte de radiação (NOVO, 2008, p.28-29)

A fim de explicar e prever o comportamento da energia radiante de sua origem até a interação com a matéria, várias leis e princípios foram propostos, dentre os quais destacam-se a Lei de Planck, a Lei de Stefan-Boltzmann, a Lei de Wien, a Lei de Kirchoff e a Lei de Rayleigh-Jeans (conforme MOREIRA, 2011), muito utilizadas em modelagem climatológica a partir de imagens de sensoriamento remoto.

Abordando especificamente as interações entre energia radiante e superfície, matéria prima do sensoriamento remoto, compreende-se a reflectância espectral como a razão entre a radiação solar refletida pela superfície incidente, que oferecerá respostas diferentes na medida em que atinge superfícies com características diferentes.

A intensidade da REM refletida por determinado alvo é função: do comprimento de onda, do ângulo de incidência, da polarização da radiação e das propriedades elétricas do alvo. O comprimento de onda, o ângulo de incidência e a polarização são propriedades da REM e podem ser controlados, até certo ponto, pelo desenho do sistema sensor. No entanto, a refletividade de um alvo depende, além dos parâmetros anteriores, das propriedades elétricas (constante dielétrica, condutividade, permeabilidade) e da textura do alvo. Embora a reflexão seja considerada como se ocorresse na superfície do material, de fato ela envolve uma penetração e uma interação da radiação com uma camada, mesmo muito fina, do alvo. De qualquer forma, a reflexão é sempre tratada como um fenômeno de superfície (MOREIRA, 2011, p.50-51)

A variação da reflectância espectral de um objeto em função do comprimento de onda compõe um gráfico conhecido como curva de reflectância espectral. O conhecimento dessa

variação é fundamental para determinar quais bandas de um sensor específico podem ser utilizadas para diferentes alvos.

As coberturas vegetais, por exemplo, apresentam variações no tempo e espaço, apresentando características diferentes em relação ao porte, umidade, estrutura foliar, produção de energia, estágio de desenvolvimento, entre outros. Fonseca e Fernandes (2002), destacam que essa resposta espectral da vegetação apresenta uma grande variação em função do comprimento de onda.

Na banda do visível, a pigmentação domina a resposta espectral, sendo o teor em clorofila o fator mais condicionante. A clorofila absorve fortemente a REM visível nos comprimentos de onda de 0,45  $\mu\text{m}$  e 0,65  $\mu\text{m}$ .

No infravermelho próximo a reflectância aumenta porque a vegetação absorve muito pouca radiação nessa banda. No infravermelho médio a água absorve fortemente a radiação em três comprimentos particulares, nomeadamente 1,4  $\mu\text{m}$ , 1,9  $\mu\text{m}$  e 2,7  $\mu\text{m}$ . Dado o alto teor em água da vegetação verde a reflectância diminui bastante nessas bandas. (FONSECA E FERNANDES, 2002, p.19)

Dessa forma, para mapeamento de vegetação, bem como o cálculo de índices de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e diferenciação de extratos arbóreos indica-se o uso de bandas que captam reflectância na faixa vermelha do visível (0,620-0,670  $\mu\text{m}$ , banda 1 do sensor MODIS/AQUA) e no infravermelho próximo (0,841-0,876  $\mu\text{m}$ , banda 2 do sensor MODIS/AQUA).

Em relação aos solos, as variações na curva de reflectância refletem principalmente o teor de água, o teor de matéria orgânica, a textura, a rugosidade da superfície e as características físicas e químicas de suas partículas.

O comportamento espectral dos solos é função principalmente da porcentagem de matéria orgânica, granulometria, composição mineralógica, umidade e capacidade de troca catiônica (CTC).

O aumento do conteúdo de matéria orgânica provoca uma diminuição da resposta espectral.

No que se refere à granulometria, com o aumento da concentração de minerais félsicos, a diminuição do tamanho das partículas provoca um aumento nos valores de reflectância e a atenuação das bandas de absorção. Ocorre o contrário à medida que se aumenta a concentração de minerais máficos (ROSA, 2009, p.47)

Quanto à textura dos solos, ocorre diferenças nas curvas de resposta espectral em relação ao tamanho das partículas do solo, visto que partículas mais finas retém mais umidade que materiais mais grosseiros. De acordo com Fonseca e Fernandes (2002, p.21), “um aumento na

dimensão das partículas de 0,022mm para 2,65mm causa um aumento de pelo menos 14% na reflectância do solo, se todos os outros fatores se mantiverem constantes”.

Em geral, os solos apresentam maior resposta espectral em faixas de infravermelho, com comprimento variando de acordo com suas características, apresentando picos de reflectância próximos a comprimentos de 1,2  $\mu\text{m}$  e 1,6  $\mu\text{m}$ , sendo que sensores com captação nessas faixas do espectro são mais indicados para o mapeamento destas estruturas. As informações disponibilizadas por bandas que captam respostas no infravermelho térmico são de grande importância por permitir a separação de tipos de solos.

Um solo que apresenta valores de reflectância baixos no visível, e mantém valores baixos no infravermelho térmico, é um solo com alto teor em água que se encontra arrefecido por evapotranspiração; por outro lado, um solo que apresenta valores baixos no visível e valores altos no infravermelho térmico é um solo relativamente seco, que contém um alto teor em matéria orgânica. (FONSECA E FERNANDES, 2002, p.22)

O conhecimento do padrão de resposta espectral dos solos em mapeamentos climatológicos é de extrema importância, pois algumas variações no fluxo de calor no solo (G) vão depender em grande parte de sua constituição mineralógica, sendo que os mapeamentos têm apontado que solos secos e com maiores porcentagens de areia apresentam valores de albedo, temperatura de superfície e fluxos de calor mais altos, o que reduz o calor latente e, em consequência, os valores de evapotranspiração.

Corpos d'água, diferentemente da vegetação e dos solos, apresentam maiores valores de reflectância dentro da faixa do visível, absorvendo totalmente a REM para comprimentos de onda acima dessa faixa, não refletindo praticamente nada nas faixas infravermelhas. Dessa forma, corpos d'água são estruturas de identificação mais simples que as demais em sensoriamento remoto.

A turbidez causada por materiais orgânicos ou inorgânicos em suspensão é um dos principais fatores que afetam a resposta espectral da água: a reflectância da água turbida é superior à da água límpida, e o pico de reflectância ocorre num comprimento de onda superior ao da água límpida.

Outro fator que contribui para a variação da reflectância da água é o seu teor em clorofila. Quando a concentração em clorofila aumenta há uma diminuição da reflectância na banda do azul e um aumento na banda do verde [...] (FONSECA E FERNANDES, 2002, p.23)

Na meteorologia, os satélites são equipados com radiômetros infravermelhos que operam mesmo no período escuro da Terra, coletando dados meteorológicos e se comunicando com plataformas destinadas a registrar parâmetros como pressão atmosférica, temperatura e velocidade dos ventos na alta atmosfera, no mar e em superfície. O primeiro satélite colocado

em órbita foi o Tiros-1 em 1960 e, a partir deste, outros sistemas foram lançados em órbita baixa ou geoestacionária (MOREIRA, 2011).

À medida que a tecnologia espacial e as técnicas de aplicação do sensoriamento remoto foram evoluindo, os satélites meteorológicos também foram se proliferando internacionalmente. Os satélites meteorológicos e ambientais são atualmente operados pelos EUA, Rússia, União Europeia, Japão, China e Índia, entre outros. [...]

Nos EUA, a agência para o oceano e atmosfera NOAA, em conjunto com a agência espacial NASA, administra o sistema civil de espaçonaves em órbitas polares. (KAMPEL, 2004 p.16)

Ainda segundo KAMPEL (2004), um dos principais instrumentos a bordo dos satélites NOAA é o sensor AVHRR, que detecta energia nas faixas do visível e do infravermelho. Possibilita a análise multiespectral em estudos oceanográficos, hidrológicos, meteorológicos e de uso da terra e cobertura vegetal.

O instrumento mede a energia solar refletida (visível e infravermelho próximo) nos canais 1, 2 e 3A. Esses dados proveem meios para o monitoramento da vegetação, cobertura de nuvens, lagos, litorais, neve, aerossóis e gelo. Os dados dos canais 3B, 4 e 5 são utilizados para detectar a energia termal emitida pela superfície terrestre (continentes e oceanos) e pela atmosfera. (KAMPEL, 2004, p.22)

A resolução espacial, ao nadir, é de 1,1 km, sendo seu uso recomendado para áreas com grandes extensões, visto que não permite detalhamento em escalas maiores. Cada faixa imageada apresenta 2.250 km de largura, gerando dados com resolução de 10 bits, a uma taxa de 39.936 amostras por segundo por canal (KAMPEL, 2004).

Moreira (2011) destaca que o uso dos satélites para pesquisa e monitoramento dos recursos naturais (satélites científicos) teve início na década de 1970, quando o ERTS-1 foi colocado em órbita, posteriormente batizado como Landsat. A partir daí, vários outros sistemas foram colocados em órbita e grandes esforços e recursos financeiros têm sido aplicados no aprimoramento destas tecnologias visando um monitoramento mais preciso e com maior periodicidade do território. Ainda de acordo com Moreira (2011), os sistemas sensores podem ser agrupados de acordo com o objetivo de criação e aplicações, podendo ser empregados nas áreas militar, científica, meteorologia e telecomunicação.

Nas décadas de 1970 e 1980, com as intensas alterações ambientais e socioeconômicas na superfície do planeta, os debates sobre as questões ambientais e possíveis mudanças no clima estimularam a criação de um programa internacional chamado EOS (*Earth Observing System*) liderado pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) para o estudo dos processos de mudanças globais. Iniciado na década de 1980, o EOS teve sua primeira



plataforma lançada em 1999 (TERRA), com observações no período da manhã e com os seguintes sensores a bordo: CERES, MODIS, ASTER E MOPITT, com passagem pelo Equador às 10:30h da manhã e órbita descendente. A segunda plataforma do EOS recebeu o nome de AQUA, foi lançada em 2002 e tem a bordo os sensores MODIS, AIRS, AMSU-A, HSB, AMSR-E e CERES. O AQUA cruza o Equador às 13:30h, com trajetória ascendente e tem por objetivo subsidiar a coleta de informações sobre o ciclo da água na Terra, além de fluxos de energia radiativa, cobertura vegetal e temperaturas do ar, da terra e da água (SOARES, BATISTA e SHIMABUKURO, 2007).

O sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) opera em 36 canais espectrais, com resolução espacial variando de 250 a 1.000 metros e com imagens disponibilizadas gratuitamente, tanto pelo INPE quanto pela NASA, em formato “hdf”, facilmente convertido para “tif”, em 12 bits, com diferentes aplicações terrestres (bandas 3, 4, 5, 6 e 7, além das bandas 20, 21, 22 e 23 que permitem o mapeamento da temperatura de superfície). A partir destas bandas, foram gerados produtos denominados MODLAND que permitem estudos aprofundados dos ecossistemas terrestres em escala média/pequena, divididos em 03 grupos, conforme Latorre, Shimabukuro e Anderson (2007, p.24):

- a) Produtos relacionados ao balanço de energia: MOD 09 (refletância de superfície); MOD 11 (Temperatura da superfície da Terra e Emissividade); MOD 43 (BRDF/Albedo); MOD 10 e 29 (Cobertura de neve e extensão de gelo na superfície do mar).
- b) Produtos relacionados à vegetação: MOD 13 (Grades de índices de vegetação (máximo NDVI e MVI integrado); MOD 15 (índice de área foliar (LAI) e FPAR); MOD 17 (fotossíntese líquida e produtividade primária)
- c) Produtos relacionados à cobertura terrestre: MOD 12 (cobertura da terra e mudança na cobertura da terra); MOD 14 (anomalias termais, fogo e queima de biomassa); MOD 44 (Conversão da cobertura vegetal).

Em especial, os produtos MOD09 (plataforma TERRA) e o MYD09 (plataforma AQUA) podem ser utilizados como dado de entrada para a obtenção de diversas informações, como albedo, índice de vegetação, fluxo de calor no solo e evapotranspiração, fundamentais à pesquisa proposta.

O produto MOD09 do MODIS é uma estimativa da refletância de superfície, e é computado a partir do nível 1A nas bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 com os comprimentos de onda centrados em 0,648  $\mu\text{m}$ , 0,858  $\mu\text{m}$ , 0,470  $\mu\text{m}$ , 0,555  $\mu\text{m}$ , 1,240  $\mu\text{m}$ , 1,640  $\mu\text{m}$  e 2,130  $\mu\text{m}$ , respectivamente. (LATORRE, SHIMABUKURO E ANDERSON, 2007, p. 24-25)

Destacam-se, ainda, os produtos MOD11 (plataforma TERRA) e MYD11 (plataforma AQUA), voltados especificamente para o mapeamento da temperatura superficial terrestre (TST) e emissividade, utilizados para estimar a TST em diferentes categorias de uso da terra e cobertura vegetal, visto sua importância para os cultivos agrícolas e para estudos que requerem essa informação e que encontram barreiras na ausência de estações climatológicas em grande parte do interior do Brasil.

De acordo com Trentin et al. (2011, p.7745), o produto MYD11

utiliza dados dos níveis 2 e 3 com o algoritmo Land Surface Temperature (LST) e emissividade recuperados dos dados do AQUA/MODIS, com resoluções espaciais de 1km e 5km da superfície terrestre em condições atmosféricas adequadas (céu limpo). O algoritmo LST é utilizado para recompor pixels com emissividades conhecidas nas bandas 31 e 32.

Dessa forma, os dados obtidos referem-se à temperatura de superfície graças ao uso dos dados de emissividade e não à temperatura de brilho, muitas vezes confundida com temperatura de superfície por alguns pesquisadores que não utilizam a emissividade como fator de correção.

Em climatologia, o conhecimento desses padrões de resposta espectral e comportamento dos objetos em diferentes comprimentos de onda é imprescindível e tem sido cada vez mais aplicado em mapeamentos de superfície e em estudos de mudanças históricas no comportamento dos elementos do clima.

Informações como a temperatura superficial terrestre (TST), por exemplo, obtidos por sensoriamento remoto, aliados a modelos matemáticos e métodos de classificação e interpolação digitais, tornam-se ferramenta fundamental ao monitoramento agrícola, suprimindo algumas carências como ausência de estações meteorológicas e pessoal especializado para operar esses tipos de estações em vastos espaços do interior do Brasil.

Esses métodos auxiliam, ainda, na estimativa de elementos como a evapotranspiração potencial e real, fundamentais para a gestão de áreas de uso agropecuário, a partir de elementos como o albedo e o fluxo de calor no solo. Para entender como o sensoriamento remoto auxilia no monitoramento climático destes elementos em superfície, é preciso retomar as equações 1 e 2, que tratam do balanço de radiação e de energia terrestre, considerando a estimativa do saldo de radiação conforme exposto por Allen et al (2002) (equação 3).

$$R_n = (1-\alpha)R_s \downarrow + R_L \downarrow - R_L \uparrow - (1 - \varepsilon_0)R_L \downarrow \quad (3)$$

Onde  $R_n$  é o saldo de radiação à superfície ( $W.m^{-2}$ );  $R_s \downarrow$  é a radiação de ondas curtas incidente à superfície ( $W.m^{-2}$ );  $R_L \downarrow$  é a radiação de onda longa incidente à superfície ( $W.m^{-2}$ );  $R_L \uparrow$  é a

radiação de onda longa refletida e emitida pela superfície ( $\text{W.m}^{-2}$ );  $\varepsilon_0$  é a emissividade da superfície (-) e  $\alpha$  é o albedo da superfície (-)

O conhecimento do saldo de radiação em escala diária, semanal ou mensal é fundamental para estimativa das perdas de água por superfícies vegetadas, bem como é necessário para o planejamento de atividades agrícolas. Em geral, o saldo de radiação é obtido a partir de medidas instrumentais, através de radiômetros ou de estimativas através de métodos empíricos. (NICÁCIO 2008, p. 28)

Por sensoriamento remoto, esses parâmetros são calculados e analisados separadamente e mapeados pixel a pixel, gerando um arquivo raster com os dados do saldo de radiação para cada pixel.

A radiação de onda longa apresenta, na equação, duas componentes principais: a radiação de onda longa incidente à superfície, emitida pela atmosfera a partir da interação de seus componentes e pelas nuvens com a radiação solar; e a radiação de onda longa emitida pela superfície, que podem ser estimadas a partir da emissividade atmosférica, da emissividade da superfície e da temperatura de superfície. Já a radiação de onda curta incidente à superfície apresenta como principal fonte o sol e pode ser medida por piranômetros, embora possa ser estimada a partir de uma equação considerando o ângulo de incidência dos raios solares e a transmissividade atmosférica.

Considerando essas variações entre ondas curtas e longas incidentes e refletidas, é possível calcular o albedo da superfície, que é definido como a razão entre a radiação incidente sobre a superfície e a radiação refletida pela superfície, sendo aplicado apenas para a reflexão da radiação de onda curta (NICÁCIO, 2008)

O albedo varia conforme as características físico-químicas das superfícies e com o ângulo zenital. Um outro fator que pode promover variações do albedo são as atividades humanas, tais como desflorestamento, agricultura e urbanização. Em superfícies vegetadas, o albedo depende da textura do solo e das condições fisiológicas da copa da planta. Já em solo seco, o albedo é expressivamente maior que o observado em solo úmido, enquanto uma superfície lisa tem albedo maior que uma superfície rugosa (HARTMANN, 1994). Para Arya (2001), as variações inadvertidas ou intencionais do albedo local, regional ou global podem causar significativa variação no balanço de energia à superfície e, com isso, favorecem variações no micro ou macro-clima. Note-se que essa variabilidade do albedo afeta diretamente a temperatura do solo (NICÁCIO, 2008, p. 26)

O albedo pode ser mensurado, em superfície, quando é possível realizar medições de radiação de ondas curtas incidente e refletida, o que limita muito a análise temporal e espacial desta variável em grandes superfícies. Nesse sentido, o sensoriamento remoto tem se mostrado

útil para estimativa do albedo, como as disponibilizadas pelos produtos MOD43 e MYD43 dos satélites Terra e Aqua (sensor MODIS) ou pelo processamento das bandas de reflectância dos produtos MOD09 e MYD09, conforme descritos no capítulo 02. Assim, gera-se um arquivo raster onde cada pixel traz informações diferentes sobre o albedo na área imageada, com variação ligada aos diferentes tipos de cobertura da superfície.

Ming e Liu (2000), em mapeamento realizado para o Estado de São Paulo a partir de imagens AVHRR/NOAA, destacaram que valores de albedo inferiores a 0,10 correspondem à corpos hídricos, entre 0,10 e 0,15 à vegetação intensa e de 0,15 a 0,25 à vegetação rasteira, pastagens e cultivos agrícolas. Valores entre 0,25 e 0,40 são típicos de áreas urbanas e com solo descoberto e regiões secas, enquanto que valores superiores a 0,40 indicam áreas com cobertura de nuvens.

O saldo de radiação na superfície, bem como o conhecimento dos valores de albedo em diferentes tipos de cobertura são fundamentais para a estimativa do fluxo de calor no solo, considerando também parâmetros como a temperatura e a velocidade do vento acima da superfície. Nicácio (2008) aponta que o principal método para estimativa desses fluxos baseia-se no balanço de energia da razão de Bowen (BERB). Para Mota (1987), o fluxo de calor no solo depende, fundamentalmente, da capacidade de calor e da condutividade térmica do substrato, sendo variável condicionante para a estimativa de evapotranspiração.

O fluxo de calor no solo é basicamente obtido por medidas próximas à superfície, ou estimado empiricamente, podendo ser uma função de índice de vegetação, da temperatura e albedo da superfície. Pode-se citar os trabalhos de Bastiaanssen (1995), Kustas e Norman (1990), Roerink e Menenti (2000) e Yunhao et al. (2003), que avaliaram o fluxo de calor no solo com medições de superfície e através de sensoriamento remoto. Em geral, esses trabalhos sugerem que medidas de campo em diferentes tipos de superfícies sejam realizadas, a fim de testar a universalidade da relação proposta. (MENDONÇA et al, 2009, p.294)

Ainda de acordo com Mendonça et al (2009, p.294), o conhecimento da oscilação da temperatura do solo é fundamental para “regiões e épocas do ano nas quais sua variação possa inibir ou prejudicar o sistema radicular das culturas”. Além disso, essa variável é fundamental para a estimativa da evapotranspiração, entendida como a combinação entre o processo de evaporação e o processo de transpiração das plantas, quantificando a perda total de água do sistema solo-planta para a atmosfera. Visando quantificar essa perda, a FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) adota o parâmetro de evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), definida por Allen (1998) como a taxa de evapotranspiração de uma superfície adotada como referência e que não apresente restrições hídricas. O autor ainda indica que a  $ET_0$

utiliza variáveis meteorológicas para sua definição, como radiação solar, velocidade do vento, temperatura e umidade relativa do ar, sendo o cálculo do balanço de energia etapa fundamental para determinação da evapotranspiração. Em situações reais que considerem a dinâmica atmosférica, as condições da cultura e a umidade do solo, calcula-se a evapotranspiração real (equação 4).

$$ET = R_n - G - H \quad (4)$$

Onde a evapotranspiração (ET) é obtida em função da radiação na superfície ( $R_n$ ), do fluxo de calor no solo (G) e do fluxo de calor sensível (H), todas medidas em  $W/m^2$ , conforme BASTIAANSEN (2000).

A principal dificuldade encontrada em estimar valores de fluxo de calor sensível encontra-se no fato de o vento exercer papel fundamental nesse processo. Caracterizado como o movimento do ar em relação à superfície terrestre, o vento é gerado pela diferença nos gradientes de pressão atmosférica, sofrendo influências do movimento de rotação da Terra, da força centrífuga e do atrito com a superfície (TUBELIS e NASCIMENTO, 1986). Os valores de velocidade e direção dos ventos são aferidos diariamente em três períodos em estações climatológicas convencionais do INMET a 10 metros de altura.

O grande entrave representado pela variável velocidade dos ventos (medido em m/s) ao cálculo do fluxo de calor sensível e, conseqüentemente, à estimativa da evapotranspiração de superfície, é que esses dados são registrados pontualmente nas estações e apresentam grande variação espacial representada pela rugosidade do terreno. Aliado ao fato de existirem poucas estações climatológicas para cobrir grandes áreas do Brasil Central, essa variável pode ser determinante em erros de estimativa de evapotranspiração em áreas com uso e cobertura do solo diferentes daqueles identificados em estações climatológicas, que geralmente apresentam solo coberto por grama e entorno livre de interferências. Para minimizar esses efeitos, utiliza-se uma altura de 200 m (valor acima da altura média da vegetação nativa da região) para estimar o efeito da resistência aerodinâmica do ar que, mesmo assim, pode apresentar valores incorretos por utilizar como base os valores registrados a 10m de altura.

Abaixo de aproximadamente 500m de altura acima da superfície terrestre, a massa de ar que desloca passa a sofrer o efeito do atrito com a superfície, crescendo com a diminuição da altura. A força de atrito age sempre na mesma direção e no sentido contrário da velocidade do vento, de modo que esta diminui progressivamente com a aproximação da superfície. (...)

Em se tratando de uma superfície vegetada, com vegetação natural ou agrícola, o padrão do perfil de vento só se estabelece a partir de uma certa altura acima do solo, que coincide ou está um pouco abaixo do topo das plantas. O valor D, medido em unidades de comprimento, é chamado de “deslocamento do plano zero”. Acima da altura D, o perfil de vento é similar àquele que é medido no posto meteorológico. Dessa forma, o valor da

velocidade do vento medida no posto a uma altura  $Z$  pode ser atribuída como a velocidade do vento, sobre uma área vegetada, a uma altura  $Z+D$ , onde  $D$  é a altura média das plantas. (TUBELIS e NASCIMENTO, 1986, p. 149;152)

Em Sistemas de Informações Geográficas, a evapotranspiração real pode ser estimada pixel a pixel com a aplicação do modelo *Surface Energy Balance Algorithms of Land* (SEBAL) proposto por Bastiaanssen (1995), desenvolvido especificamente para estudar os fluxos de calor no solo e estimar a evapotranspiração em regiões para as quais não se dispõe de dados meteorológicos consistentes. Assim, toda a análise é feita por dados multiespectrais de satélite, com poucas observações de campo e de superfície, como velocidade do vento e temperatura do ar.

O estudo das variáveis componentes do Balanço de Radiação, bem como valores derivados de fluxo de calor e evapotranspiração são fundamentais em climatologia, principalmente para compreender o comportamento do ciclo hidrológico em determinada região. Essas estimativas tornam possível, por exemplo, planejar atividades de irrigação para obter melhores resultados em cultivos agrícolas, estimar necessidade de reposição de água no solo e desenvolver estudos de recarga de água em subsuperfície, além de permitir a compreensão de mudanças climáticas e ambientais provocadas por mudanças em padrões de albedo, temperatura de superfície e índice de vegetação impulsionadas pelo aproveitamento econômico desses ambientes para produção agropecuária.

O SEBAL vem sendo utilizado por vários pesquisadores no mundo todo para diversos agrossistemas, destacando os estudos de Bastiaanssen (1995; 2000), Bastiaanssen et al (1998), Ahmad e Bastiaanssen (2003), Ayenew (2003), Hemakumara et al (2003), Tasumi et al (2005), Bezerra (2006) Kongo e Jewitt (2006), Kimura et al (2007), Mendonça (2007), Nicácio (2008), Mendonça et al (2009), Lima et al (2014), entre outros. Em grande maioria, essas pesquisas utilizaram como base imagens do sensor AVHRR-NOAA e da série de satélites Landsat, principalmente o sensor TM. (NICÁCIO, 2008)

No Brasil, a primeira tentativa de se fazer análise do desempenho da irrigação com base em imagens de satélite e com o uso do modelo SEBAL é atribuída a BASTIAANSSEN *et al.* (2001). Esse trabalho descreve e avalia o uso de indicadores de desempenho da irrigação em uma área piloto localizada no Distrito de Irrigação Senador Nilo Coelho, em Pernambuco, a partir da combinação de medidas obtidas de 11 imagens distribuídas entre 1998 e 1999, com dados de levantamento de campo.

PAIVA (2005) também utilizou imagens AVHRR-NOAA para a estimativa das componentes do balanço de energia e da temperatura da superfície. Para isso, foram realizados experimentos de campo na região de Dourados-MS, em dezembro/1999. Para a obtenção dos dados que possibilitassem a aplicação do SEBAL e sua validação, foram realizados lançamentos de radiossondas,

medidas de emissividade e temperatura da superfície e medidas de fluxo de calor. Foram observados erros de 4%, 6% e 7% entre os valores derivados pelo SEBAL e as medidas em campo do saldo de radiação, fluxo de calor sensível e fluxo de calor latente, respectivamente. (NICÁCIO, 2008, p. 62)

A grande maioria das publicações em periódicos, dissertações de mestrado e teses de doutorado, no Brasil, que utilizam o SEBAL como metodologia apresentam, na maioria das vezes, as mesmas referências, remetendo às publicações de proposição e validação do modelo, especificamente as de Bastiaanssen (1995; 1998; 2000; 2002) e Allen et al (2002). Os principais grupos de pesquisa concentram-se nos estados da Paraíba (UFBP e UFCG) e Rio de Janeiro (UFRJ), além de publicações em menor volume nos estados do Paraná, Santa Catarina e Minas Gerais, sempre com aplicações voltadas para áreas de clima semi-árido e regiões de agricultura irrigada.

Entre as dissertações de mestrado e teses de doutorado desenvolvidas no Brasil utilizando o algoritmo SEBAL, destacam-se os trabalhos de Giacomoni (2005) pela UFRGS, Bezerra (2006) pela UFCG, Nicácio (2008) pela UFRJ, Gomes (2009) pela UFCG, Leite (2011) pela UFU, Uda (2012) pela UFSC, entre outros. As principais publicações em periódicos concentram-se na Revista Brasileira de Meteorologia, Journal of Hydrology, Elsevier, Journal Hydrologic Engineering, além de anais de eventos como o Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto e do Congresso Brasileiro de Meteorologia. Percebe-se que a utilização desta metodologia em programas de pós-graduação em geografia no Brasil é insignificativa se comparada à sua utilização nas áreas de meteorologia, recursos hídricos e até mesmo em engenharia civil. Existem também poucas publicações do tema em revistas específicas de Geografia e periódicos ligados a programas de pós-graduação em Geografia no Brasil.

## 2. ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO UTILIZANDO O ALGORITMO SEBAL

Uma das condições fundamentais para compreender o ambiente, bem como determinar categorias de uso da terra, planejar áreas de produção agrícola e determinar áreas de preservação e conservação é estudar e entender os fluxos de energia e matéria do planeta terra. Nesse sentido, o desenvolvimento e adaptação de modelos é extremamente importante para estudos ambientais, por permitirem representar ou reconstruir a realidade de determinado local de forma simplificada, englobando as principais variáveis que interferem nessa dinâmica, permitindo prever um comportamento, uma transformação ou uma evolução (CHRISTOFOLETTI, 2000).

A definição apresentada por Haggett e Chorley (1967; 1975) ainda permanece como sendo mais adequada, assinalando que “modelo é uma estruturação simplificada da realidade que supostamente apresenta, de forma generalizada, características ou relações importantes. Os modelos são aproximações altamente subjetivas, por não incluírem todas as observações ou medidas associadas, mas são valiosos por obscurecerem detalhes acidentais e por permitirem o aparecimento dos aspectos fundamentais da realidade”. Nesse procedimento de transposição e elaboração de um esquema representativo, deve-se salientar que não é a realidade em si que se encontra representada, mas sim a nossa visão e a maneira de como percebemos e compreendemos essa realidade. (CHRISTOFOLETTI, 2000 p. 08)

Em climatologia, Christofolletti (2000, p.15) salienta que o objetivo da modelagem é “simular os processos e predizer os efeitos resultantes nas mudanças e nas interações internas”. No caso da pesquisa desenvolvida, que teve como objetivo central a adaptação do modelo SEBAL (BASTIAANSSEN, 1995) para áreas de clima tropical na bacia do Rio Paranaíba com a finalidade de estimar valores de evapotranspiração real em diferentes usos da terra e coberturas vegetais, a (re) criação dessas realidades em ambiente computacional é fundamental para o estudo do comportamento espacial e sazonal desta variável.

A evapotranspiração representa uma fração importante do ciclo hidrológico, na qual evaporação e transpiração atuam em conjunto no transporte hídrico entre a superfície terrestre e a atmosfera.

A evapotranspiração define a perda total de água do sistema solo-planta para a atmosfera. Uma boa estimativa dos processos de evapotranspiração é importante tanto para um coerente planejamento e gerenciamento de sistemas de irrigação como para estudos hidrológicos que visem a modelagem do escoamento superficial. [...] Os principais problemas encontrados nesses modelos podem ser atribuídos a grande variabilidade espacial da precipitação



e às incertezas nos dados de evapotranspiração. Dessa maneira, uma melhoria na estimativa da evapotranspiração e a disponibilização de metodologias alternativas que demandem uma menor quantidade de informações de campo contribuiriam para uma melhoria na administração dos recursos hídricos disponíveis em uma bacia hidrográfica. (NICÁCIO, 2008, p. 38)

A criação, adaptação e/ ou adoção de modelos que estimem variáveis como albedo, índice de vegetação, temperatura de superfície, fluxo de calor no solo e evapotranspiração, entre outras, é importante sobretudo em áreas com grande extensão territorial, áreas com cobertura insuficiente de estações climatológicas e meteorológicas, áreas de difícil acesso ou que apresentam grandes dificuldades e/ou custos de coletas de dados em campo, etc.

Inicialmente desenvolvido para uso com imagens TM/Landsat5 e ETM+/Landsat7, vários estudos tem procurado adaptar o algoritmo SEBAL para trabalhar a partir de imagens de outros sensores e satélites, como o sensor AVHRR/NOAA e, mais especificamente, o sensor MODIS/AQUA, material de estudo da pesquisa aqui apresentada.

Conforme exposto na seção 1, o sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) opera em 36 canais espectrais, com resolução espacial variando de 250 a 1.000 metros e com imagens disponibilizadas gratuitamente, tanto pelo INPE quanto pela NASA, em formato “hdf” (*Hierarchy Data Format*), facilmente convertido para “tif”.

O instrumento MODIS possui alta sensibilidade radiométrica (12 bits) em 36 bandas espectrais contidas no intervalo de 0,4 a 14,4  $\mu\text{m}$  do espectro eletromagnético. Duas bandas são adquiridas na resolução de 250 m [bandas 1 e 2], outras cinco bandas na resolução de 500 m [bandas 3 a 7] e as demais 29 bandas em 1 km. A varredura de 55° para cada lado na órbita de 705 Km de altura resulta numa faixa imageada de 2.330 km, com cobertura global em 2 dias. (SOARES, BATISTA E SHIMABUKURO, 2007, p.11)

As imagens dos produtos do sensor MODIS (satélite TERRA ou AQUA), em formato “hdf” podem ser obtidas gratuitamente no site “<http://modis.gsfc.nasa.gov/>”. É possível obter tanto imagens diárias quanto composições de 8 dias de várias imagens. Embora as composições apresentem melhor qualidade e menor quantidade de nuvens, não são adequadas para estimar valores horários e diários de evapotranspiração. Para a leitura e conversão destes arquivos para formatos aceitos pela maioria dos softwares de processamento de imagens e sistemas de informações geográficas, foi desenvolvido um programa de download livre chamado *Modis Reprojection Tool*, que também permite a montagem de mosaicos de imagens.

Outra facilidade disponibilizada pelo USGS (Serviço Geológico dos Estados Unidos) é a versão online do *Modis Reprojection Tool* (<https://mrtweb.cr.usgs.gov/>), onde o usuário pode escolher as imagens de seu interesse (*Tiles*), definir os produtos MODIS que serão necessários

em seus estudos e fazer o download das imagens já mosaicadas, convertidas para formato .tif e com o sistema de referência escolhido pelo usuário.

As imagens encontram-se em projeção sinusoidal, organizadas em “*tiles*” de 10 x 10 graus, numerados de 0 a 35 (H) no sentido longitudinal e de 0 a 17 (V) no sentido latitudinal, cobrindo toda a superfície do planeta. Para cobrir toda a extensão da bacia do Rio Paranaíba, foram utilizados os *Tiles* H12V10, H13V10 e H13V11.

Anderson et al (2003), ao realizar uma abordagem geral sobre o sensor MODIS, destacam que tanto o satélite TERRA (lançado em dezembro de 1999 e com coleta de dados a partir de fevereiro de 2000) quanto o satélite AQUA (lançado em maio de 2002), apresentam o sensor MODIS como principal sensor a bordo. Uma das principais diferenças entre os dois satélites está em sua órbita e no horário de passagem pelo Equador: enquanto o satélite TERRA apresenta órbita descendente, passando pelo Equador às 10:30h, o satélite AQUA apresenta órbita ascendente, passando pelo Equador às 13:30h, tendo sido escolhido para este estudo por coletar dados em horário considerado como pico do processo de evapotranspiração.

A segunda plataforma do EOS recebeu o nome latino de Aqua. Ela tem por objetivo subsidiar a coleta de informações sobre o ciclo da água na Terra, inclusive a evaporação dos oceanos, vapor d'água na atmosfera, nuvens, precipitação, umidade da superfície da terra, gelo no mar, gelo na terra, e cobertura de neve. Outros parâmetros que também podem ser medidos pela Aqua incluem fluxos de energia radiativa, aerossóis, cobertura vegetal, fitoplâncton e matéria orgânica dissolvida nos oceanos, e temperaturas: do ar, da terra e da água. [...] (SOARES, BATISTA E SHIMABUKURO, 2007, p.06)

Entre os produtos relacionados ao balanço de energia, utilizados nesse estudo para alimentar o modelo SEBAL para estimar valores de evapotranspiração, destacam-se os produtos MOD09 (TERRA) e MYD09 (AQUA) de refletância de superfície, os produtos MOD43 (TERRA) e MYD43 (AQUA), que captam o albedo em diferentes superfícies, e os produtos MOD e MYD 10 e 29, responsáveis pelo imageamento da cobertura de neve e extensão do gelo na superfície do mar.

Em especial, os produtos MOD09 (TERRA) e o MYD09 (AQUA) podem ser utilizados como dado de entrada para a obtenção de diversas informações, como albedo, índice de vegetação, fluxo de calor no solo e evapotranspiração, fundamentais à pesquisa proposta.

O produto MOD09 do MODIS é uma estimativa da refletância de superfície, e é computado a partir do nível 1A nas bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 com os comprimentos de onda centrados em 0,648  $\mu\text{m}$ , 0,858  $\mu\text{m}$ , 0,470  $\mu\text{m}$ , 0,555  $\mu\text{m}$ , 1,240  $\mu\text{m}$ , 1,640  $\mu\text{m}$  e 2,130  $\mu\text{m}$ , respectivamente. (LATORRE, SHIMABUKURO E ANDERSON, 2007, p. 24-25)

Para visualizar as imagens do produto MYD09GA, escolhido por fornecer dados a cada 2 dias, em composição colorida (RGB), recomenda-se utilizar os canais do vermelho (banda 1), infravermelho próximo (banda 2) e infravermelho médio (banda 5) ou infravermelho distante (banda 7). Os canais do vermelho e infravermelho próximo também são utilizados para calcular o índice de vegetação (NDVI) e as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 para o cálculo do albedo de superfície.

Destacam-se, ainda, os produtos MOD11AI (TERRA) e MYD11A1 (AQUA), voltados especificamente para o mapeamento da temperatura superficial terrestre (TST) e emissividade, utilizados para estimar a TST em diferentes categorias de uso da terra e cobertura vegetal com imagens diárias e resolução espacial de 1Km.

### 2.1. Instrumentação e Procedimentos

Para a área delimitada para este estudo, que apresenta grande extensão territorial (aproximadamente 230.000 km<sup>2</sup>) e cobertura insuficiente da rede de observação de superfície (estações automáticas e convencionais) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e da Agência Nacional de Águas (ANA) que apresentem séries históricas de dados, a adoção de modelos torna-se indispensável. Considera-se como série histórica estações que apresentem, no mínimo, 25 anos de dados completos ou um período superior, sendo que neste estudo foi utilizado um período de 42 anos.

De acordo com Allen et al (2002), o cálculo da evapotranspiração pode ser feito com bastante precisão usando lisímetros, técnicas de correlação e a técnica de razão de Bowen mas, embora apresentem uma maior precisão, estes métodos são limitados por fornecerem valores de evapotranspiração para pontos específicos e não em escala regional. Nesse sentido, as técnicas de sensoriamento remoto têm se mostrado importantes para avaliar a evapotranspiração em escala regional. A grande vantagem encontrada na utilização de modelos alimentados por imagens obtidas por detecção remota é que a evapotranspiração pode ser calculada sem a necessidade de quantificação de outros processos hidrológicos mais complexos.

O SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithms for Land*), desenvolvido por Bastiaanssen (1995), é um dos mais completos modelos para estudos de fluxo de calor na superfície com o uso de imagens de satélite e algumas informações climatológicas, como temperatura do ar e velocidade dos ventos. Essencialmente matemático, o modelo evita o emprego de suposições, diminuindo a margem de erro em sua validação.

A grande vantagem do modelo SEBAL para estimativa de fluxos de calor na superfície e evapotranspiração real é que os componentes do cálculo do saldo de radiação podem ser mensurados separadamente, permitindo uma estimativa mais precisa. Outra vantagem é que ele necessita de poucas informações coletadas em campo, podendo ser aplicado em grandes extensões de terra. A escala dos resultados vai estar relacionada ao tamanho do pixel da imagem utilizada, sendo que estudos em áreas com usos da terra e coberturas vegetais muito heterogêneas requerem imagens com resoluções espaciais maiores. Conforme afirma Moreira (2010),

os resultados dos estudos de validação são satisfatórios apesar de o algoritmo SEBAL ser fundamentado em formulações empíricas. BASTIAANSEN (2000) comparou as estimativas do SEBAL com medições de campo e obteve um erro relativo na fração evaporativa de 20%, 10% e 1% nas escalas de 1 km, 5 km e 100 km, respectivamente, concluindo que o SEBAL mostra melhores resultados em escala regional, como também em áreas com superfície heterogênea. (MOREIRA et. al., 2010, p. 1149)

No caso do mapeamento realizado para a Bacia do Rio Paranaíba, foi considerada uma escala de 1:2.000.000, que ficaria bem representada em uma impressão em papel A3. Para apresentação em A4 e no corpo do texto, essa escala torna-se menor, na casa de 1:3.000.000.

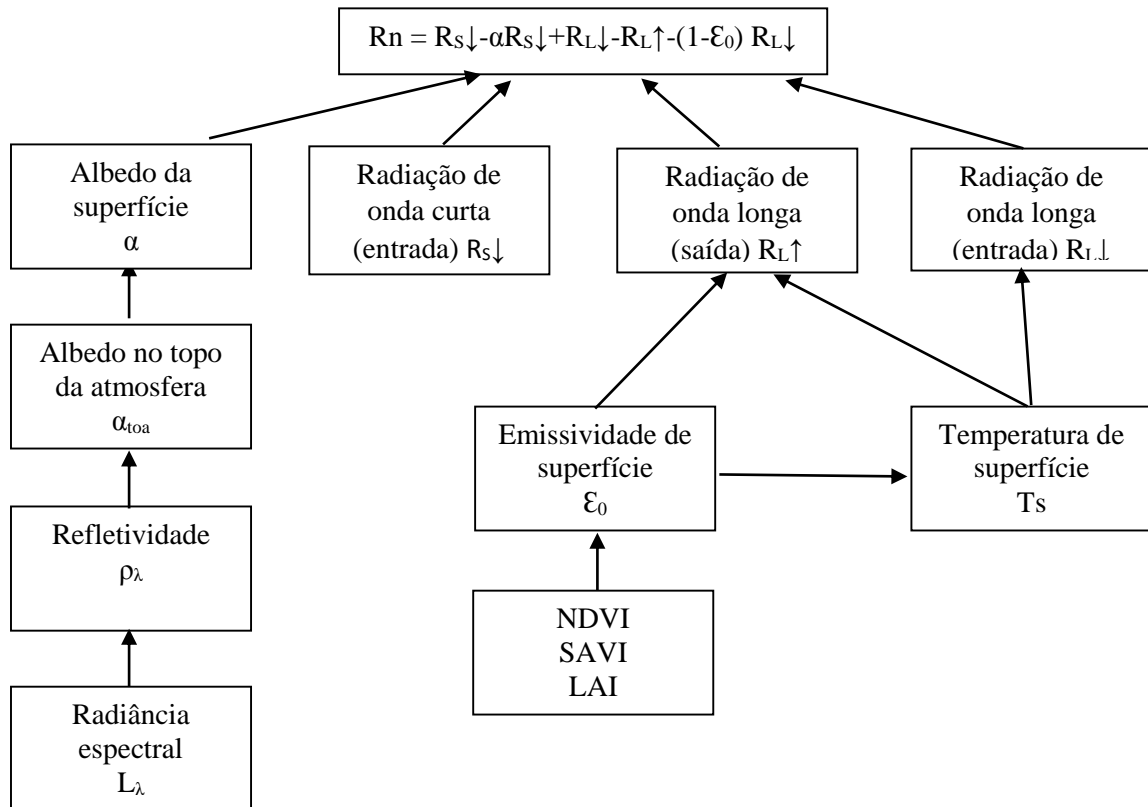
Para compreender os resultados gerados a partir da aplicação do algoritmo SEBAL é preciso analisar as diversas etapas em que ele se subdivide, sendo a primeira variável o balanço de energia na superfície que, conforme apresentado na figura 1, é calculado a partir da estimativa das radiações de onda curta e longa incidente e refletida pela superfície, além do albedo e da emissividade da superfície.

O albedo de superfície pode ser definido como a razão entre a radiação solar refletida pela superfície e a radiação incidente, sendo a irradiância solar a principal fonte de energia nesse processo, condicionando a temperatura da superfície e a intensidade dos fluxos de energia entre atmosfera e superfície, além de processos como evapotranspiração e produtividade primária (OKE, 1987). Com a interceptação da irradiância solar pelos diferentes alvos na superfície, podem ocorrer fenômenos como reflexão, absorção, transmissão, espalhamento e emissão, que são utilizados para estimar o balanço de radiação que, por sua vez, determina o equilíbrio térmico de um ecossistema ou região.

As mudanças no albedo da superfície podem interferir diretamente nos padrões de evapotranspiração e, conseqüentemente, atingir o ciclo hidrológico com aumentos ou reduções

nos índices de precipitação local, conforme apontam alguns estudos como os de Nobre et al (1991), Souza Filho et al (2006), Andrade et al (2010), entre outros.

**Figura 1.** Organograma do cálculo do saldo de radiação à superfície ( $R_n$ ).



Adaptado de: Allen et al (2002)

Utilizando a modelagem do algoritmo SEBAL, é preciso seguir três etapas para obter os valores de albedo em superfície. Primeiramente, é preciso conhecer a radiância espectral para cada banda do sensor utilizado, considerando valores mínimo e máximo dos pixels. Esses valores são necessários na segunda etapa do processamento para calcular a refletividade de cada banda e, então, na terceira etapa calcula-se o albedo no topo da atmosfera a partir da refletividade de cada banda e um coeficiente obtido pelo somatório da média da irradiância na atmosfera. Nesse procedimento, utilizado predominantemente para produtos TM/Landsat, o albedo é obtido a partir de cálculo com o albedo do topo da atmosfera, dividido pela transmissividade atmosférica (Conforme descrito em Allen et al (2002)).

Como os produtos MODIS (TERRA OU AQUA) apresentam processamentos de correção atmosférica e informações de radiância e refletividade, utilizou-se de um

procedimento descrito por Nicácio (2008) e Andrade et al (2010) para o produto MYD09GA (MODIS/AQUA), que traz uma estimativa da reflectância espectral em cada banda, excluindo os efeitos da absorção e do espalhamento atmosférico (equação 5). Antes de executar a equação, é necessário multiplicar cada banda do MYD09GA por um fator de correção de 0,0001, necessário para adaptar a imagem que originalmente está em resolução de 12 bits para a metodologia proposta para imagens TM/Landsat, com resolução de 8 bits.

$$\alpha = 0,160\rho_1 + 0,291\rho_2 + 0,243\rho_3 + 0,116\rho_4 + 0,112\rho_5 + 0,081\rho_7 - 0,0015 \quad (5)$$

Onde  $\rho_1, \rho_2... \rho_7$  correspondem às bandas de reflectância do produto MYD09GA

A radiação de onda curta (ALLEN et al, 2002), entendida aqui como dados de entrada no sistema ( $R_s \downarrow$ ), é o fluxo de radiação solar direta e difusa que realmente atinge a superfície da terra. Pode ser calculada conforme a equação 6 (em  $W/m^2$ ), assumindo condições de céu limpo.

$$R_s \downarrow = G_{sc} * \cos \theta * d_r * \tau_{sw} \quad (6)$$

Onde  $G_{sc}$  corresponde a uma constante solar ( $1367W/m^2$ );  $\cos \theta$  é o cosseno do ângulo de incidência solar, fornecido nos metadados do produto MYD09GA;  $d_r$  é o inverso do quadrado da distância entre Terra e Sol, calculado para o dia da imagem utilizada (calendário juliano); e  $\tau_{sw}$  é a transmissividade atmosférica que, por sua vez, pode ser obtida pela equação 7 (onde  $z$  corresponde à elevação em relação ao nível do mar). Neste caso, utilizamos a imagem SRTM/NASA (2000) com resolução espacial de 90 metros da área como dado de entrada para a variável  $z$ , calculando a transmissividade para cada pixel.

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

Para calcular a fração do balanço de energia correspondente à radiação de onda longa emitida pela superfície ( $R_L \uparrow$ ), é necessário conhecer os valores de NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), de SAVI (Índice de Vegetação Ajustado ao Solo), de LAI (Índice de Área Foliar), emissividade de superfície e temperatura de superfície, conforme esquema da figura 01 (ALLEN et al, 2002). A radiação de onda longa emitida pela superfície ( $W/m^2$ ) corresponde ao fluxo de radiação térmica emitido pela superfície da Terra para a atmosfera, calculada conforme a equação 8.

$$R_L \uparrow = \varepsilon_0 * \sigma * T_s^4 \quad (8)$$

Para a obtenção da variável “ $\varepsilon_0$ ”, que corresponde à emissividade da superfície (equação 12), é necessário obter, previamente, o índice de área foliar (LAI), que por sua vez depende da determinação do SAVI e do NDVI. “ $\sigma$ ” corresponde à constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$ ) e “ $T_s$ ” corresponde à temperatura de superfície (K).

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), obtido pela equação 9 (DEERING et al, 1975), corresponde ao índice utilizado para fazer análises sobre a cobertura vegetal em diferentes escalas, sendo gerado pela diferença entre a reflectância no canal do infravermelho próximo e a reflectância no canal do vermelho. O resultado da equação varia de -1 a +1 e, quanto maior o valor do índice, maior a presença de vegetação.

$$NDVI = \frac{\rho_{ivp} - \rho_v}{(\rho_{ivp} + \rho_v)} \quad (9)$$

Onde  $\rho_{ivp}$  é a reflectância na banda que capta respostas espectrais no infravermelho próximo, no caso do produto MYD09 a banda 2; e  $\rho_v$  é a reflectância na banda do vermelho, a banda 1 do produto MYD09.

Na opinião de vários pesquisadores, dentre eles Chen et al (1986), Vygodskaya et al (1989) e Woengamd et al (1991), o emprego de índices de vegetação, para caracterizar e quantificar determinado parâmetro biofísico de culturas agrícolas, tem duas grandes vantagens: a) permite reduzir a dimensão das informações multiespectrais, através de um simples número, além de minimizar o impacto das condições de iluminação e visada; e b) fornece um número altamente correlacionado aos parâmetros agrônômicos. (MOREIRA, 2011, p.182)

No SEBAL, após o cálculo do NDVI, é necessário calcular o SAVI, que corresponde ao Índice de Vegetação Ajustado ao Solo que, segundo Allen et al (2002) é um índice que tem como objetivo subtrair os efeitos do fundo do solo na imagem do NDVI (equação 10), gerando um número geralmente menor do que o índice de vegetação.

$$SAVI = (1 + L) * \frac{(\rho_{ivp} - \rho_v)}{(L + \rho_{ivp} + \rho_v)} \quad (10)$$

Nessa equação, L corresponde a uma constante para o SAVI e varia de acordo com os solos da área. Segundo Allen et al (2002), se o L for igual a 0, o valor do SAVI será o valor do NDVI. Frequentemente, a literatura sugere o valor de 0,5 para a constante L, em diferentes tipos de solo. Na proposição do modelo, Bastiaanssen (1995) utilizou um valor de 0,1 para L, que seria mais adequado para sua área de experimentação.

Um fator que poderia dar maior exatidão aos resultados do SEBAL seria considerar os diferentes tipos de solo da área estudada, visto que cada um apresenta capacidade de armazenamento de água diferenciado (CAD), de acordo com sua granulometria, estruturação e material de origem. Por exemplo, enquanto latossolos em geral apresentam capacidade de armazenamento de 250mm, esses valores em neossolos quartzarênicos não chegam a 70mm (SPERA et al, 1999), o que traduz dimensões diferentes dos efeitos da perda de água por evapotranspiração em diversas condições de textura, matéria orgânica, etc.

Após o cálculo do SAVI, é possível conhecer o índice de área foliar da região estudada (LAI), variável necessária para se conhecer a emissividade da superfície utilizada no cálculo do saldo de radiação. De acordo com Allen et al (2002), o índice de área foliar é a razão da área total de todas as folhas de uma planta para a área do solo representado pela planta, sendo um indicador de biomassa e de resistência do dossel, podendo ser obtido conforme a equação 11. O valor máximo para o LAI é de 6,0, correspondendo ao valor máximo de SAVI.

$$LAI = - \frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (11)$$

A emissividade de superfície ( $\epsilon_0$ ) é a razão entre a energia térmica irradiada pela superfície e a energia térmica irradiada por um corpo negro à mesma temperatura (equação 12). Allen et al (2002), destacam que existem dois cálculos para a emissividade: a  $\epsilon_{NB}$ , utilizada para calcular a emissão termal para a banda 6 do sensor TM/Landsat; e a  $\epsilon_0$ , utilizada nesse estudo, considerando a adoção de imagens MODIS/AQUA, necessária para calcular o total de radiação de onda longa emitida pela superfície. Nessa relação, quando o Índice de Área Foliar for maior ou igual a 3, a emissividade será igual a 0,98 (ALLEN et al, 2002, p.20). No caso da área de estudo, onde o LAI médio não ultrapassa 1,8 é necessário utilizar a equação para estimar a emissividade média.

$$\epsilon_0 = 0,95 + 0,01LAI \quad (12)$$

A última variável necessária para o cálculo da radiação de onda longa emitida pela superfície corresponde à temperatura de superfície (K), que pode ser obtida com o uso do produto MYD11 do MODIS/AQUA.

Entre os diversos produtos obtidos do sensor MODIS, destacam-se os produtos MOD11 (TERRA) e MYD11 (AQUA), voltados especificamente para o mapeamento da temperatura superficial terrestre (TST) e emissividade, utilizados para estimar a TST em diferentes



categorias de uso da terra e cobertura vegetal, visto sua importância para os cultivos agrícolas e para estudos que requerem essa informação e que encontram barreiras na ausência de estações climatológicas em grande parte do interior do Brasil.

De acordo com Trentin et al. (2011, p.7745), este produto

utiliza dados dos níveis 2 e 3 com o algoritmo Land Surface Temperature (LST) e emissividade recuperados dos dados do AQUA/MODIS, com resoluções espaciais de 1km e 5km da superfície terrestre em condições atmosféricas adequadas (céu limpo). O algoritmo LST é utilizado para recompor pixels com emissividades conhecidas nas bandas 31 e 32.

Dessa forma, os dados obtidos referem-se à temperatura de superfície graças ao uso dos dados de emissividade e não à temperatura de brilho, muitas vezes confundida com temperatura de superfície por alguns pesquisadores que não utilizam a emissividade como fator de correção. Os dados foram convertidos para graus de temperatura utilizando a ferramenta Raster Calculator do ArcGis10.1® por matemática de bandas aplicando um fator de multiplicação igual a 0,02 (ARRAES, LAMPARELLI e ROCHA, 2011) e, posteriormente, subtraiu-se o valor de 273,15 para converter as temperaturas de graus Kelvin para graus Celsius. É importante ressaltar que deve ser usada uma imagem do mesmo dia e horário das imagens utilizadas no balanço de radiação.

O último componente da fórmula para obtenção do saldo de radiação à superfície corresponde à radiação de onda longa incidente ( $RL \downarrow$ ), calculada pela equação 13, que é o fluxo de radiação para baixo a partir da atmosfera. O cálculo é feito utilizando a constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma$ ), a emissividade da atmosfera ( $\varepsilon_a$ ) e a temperatura de superfície ( $T_a$ ).

$$RL \downarrow = \varepsilon_a * \sigma * T_a^4 \quad (13)$$

A emissividade atmosférica pode ser calculada a partir do perfil logarítmico da transmissividade atmosférica (equação 14), conforme Allen et al (2002).

$$\varepsilon_a = 0,85 * (-\ln \tau_{sw})^{0,09} \quad (14)$$

Assim, o saldo de radiação à superfície pode ser calculado com todas as suas variáveis, dando fim à primeira etapa do SEBAL. Na segunda etapa do modelo, obtém-se o fluxo de calor no solo (G) em função do saldo de radiação, albedo de superfície, temperatura de superfície e NDVI. Nesta mesma etapa, o SEBAL permite a obtenção do fluxo de calor sensível (H), que deve ser calculado com maior atenção na escolha do pixel quente e do pixel frio. O saldo de radiação à superfície obedece a equação 15:

$$Rn = RS \downarrow - \alpha RS \downarrow + RL \downarrow - RL \uparrow - (1 - \epsilon_0) RL \downarrow \quad (15)$$

O fluxo de calor no solo (G) é a taxa de armazenamento de calor no solo e vegetação devido ao fenômeno da condução. O valor de G pode ser calculado pela equação 16, desenvolvida por Bastiaanssen (2000) e descrita por Allen et al (2002), Nicácio (2008), entre outros, representando valores próximos ao meio dia e, no caso das imagens utilizadas, aproximadamente às 14:30h:

$$G = [Ts/\alpha(0,0038\alpha + 0,0074\alpha^2)(1 - 0,98NDVI^4)]Rn \quad (16)$$

Onde Ts é a temperatura de superfície (em graus Celsius);  $\alpha$  o albedo de superfície; NDVI o índice de vegetação; Rn o saldo de radiação à superfície. Para calcular o fluxo de calor no solo é necessário elaborar, previamente, um mapa de uso da terra e cobertura vegetal, pois os diferentes usos da superfície, bem como os tipos de solo, podem afetar o valor de G, sendo esse um termo difícil de avaliar. Essa equação não se aplica às áreas cobertas por espelhos d'água, sendo necessário criar uma máscara para essas feições.

Para estimar a variável G em corpos d'água (em W/m<sup>2</sup>), onde os valores de NDVI forem negativos, multiplica-se o saldo de radiação obtido nessas áreas por 0,3 ( $G = 0,3Rn$ ), conforme Allen et al (2002).

O fluxo de calor sensível (H) é a taxa de perda de calor para o ar por convecção e condução, graças a uma diferença de temperatura, calculado de acordo com a equação 17, descrita por Allen et al (2002):

$$H = \frac{\rho * cp * dT}{rah} \quad (17)$$

Onde  $\rho$  é a densidade do ar (1,15 kg/m<sup>3</sup>); cp é o calor específico do ar (1004J/kg<sup>-1</sup>/K); dT (K) é a diferença da temperatura entre duas alturas; e rah é a resistência aerodinâmica para transporte de calor (m/s). Dessa forma, observa-se que o fluxo de calor sensível é uma função da variação de temperatura, velocidade do vento e rugosidade da superfície, necessitando, assim, de informações climatológicas obtidas em estações de observação de superfície.

Allen et al (2002) destacam que essa é uma equação de difícil solução por apresentar duas incógnitas, representadas por rah e dT, sendo necessária a adoção de “pixels âncora”. Ferreira e Meirelles (2011), com base nos estudos de Allen et al (2002) e Nicácio (2008),

colocam um valor constante para  $\rho$  de  $1,15\text{kg.m}^{-3}$  em estudo realizado na mesorregião Sul Goiano, além de facilitar o cálculo de  $dT$  pela equação 18.

$$H = \rho * cp * (a + bTs)/rah \quad (18)$$

Os valores dos coeficientes  $a$  e  $b$  são obtidos a partir de pixels âncoras, também chamados de pixels quente e frio, selecionados na área de estudo. O pixel “frio” é selecionado em áreas de corpos d’água ou inundada, enquanto o pixel “quente” geralmente é obtido numa área de solo exposto. Para o pixel frio os valores de calor sensível foram considerados zero ( $H=0$ ), pois uma parte da energia disponível para a superfície é utilizada nos processos de evapotranspiração e, dessa maneira a maior parte do  $R_n$  é constituída do fluxo de calor latente ( $\lambda ET$ ). No pixel quente o valor do calor latente foi considerado nulo ( $\lambda ET=0$ ) (FERREIRA E MEIRELLES, 2011, p.5580)

A diferença de temperatura ( $dT$ ) é calculada a partir dos pixels âncora (onde  $dT = b + aTs$ ), sendo que a  $dT$  do pixel frio é considerada com valor zero. Já no pixel quente, o calor sensível é considerado como máximo ( $H = R_n - G$ ), sendo sua  $dT$  calculada pela equação 19.

$$dTq = H * rah / \rho * Cp \quad (19)$$

Conhecidos os valores de diferença de temperatura nos pixels âncora, calcula-se os coeficientes  $a$  e  $b$ , sendo que  $dTq = b + aTs_q$  e  $dTf = b + aTs_f$ , onde  $Ts_q$  e  $Ts_f$  correspondem, respectivamente, às temperaturas registradas no pixel quente e no pixel frio.

Algumas observações nesse ponto são importantes: a) Para encontrar o pixel frio, deve-se verificar os valores de temperatura sobre corpos hídricos, bem como sobre áreas de silvicultura e agricultura irrigada, pois estas últimas podem apresentar temperaturas semelhantes ou até mesmo inferiores às dos corpos hídricos em determinadas regiões e determinados períodos do ano; b) A temperatura de superfície, em um cenário ideal, deveria ser medida em campo por termômetros e, na ausência dessa informação, pode ser estimada por equação de regressão, utilizando valores de altitude, latitude e longitude. Pode-se também utilizar a temperatura de superfície obtida pelo produto MYD11A1, embora os valores apresentem-se, em média,  $5,2^\circ\text{C}$  superiores aos registrados em estações climatológicas (MARTINS e ROSA, 2014).

Para áreas que não dispõem de informações de temperatura do ar,  $dT$  deve ser gerado em forma de imagem utilizando o mapa de temperatura de superfície, com a equação calculada por matemática de bandas utilizando os coeficientes  $a$  e  $b$ . Dessa forma, resta determinar a

resistência aerodinâmica para transporte de calor ( $rah$ ), calculada pela equação 20, também descrita por Allen et al (2002).

$$rah = \frac{\ln\left(\frac{z2}{z1}\right)}{ux * k} \quad (20)$$

Onde  $z1$  e  $z2$  são alturas em metros acima do deslocamento do plano zero da vegetação, sendo  $z2$  considerado como 200 metros e  $z1$  como a altitude para registro da velocidade do vento nas estações convencionais do INMET (10 metros);  $ux$  é a velocidade de atrito (m/s) que quantifica as flutuações de velocidade de turbulência no ar (equação 21); e  $k$  é a constante de Von Karman (0,41).

$$ux = \frac{k * u200}{\ln\left(\frac{200}{zom}\right)} \quad (21)$$

Na equação 21,  $ux$  corresponde à velocidade do vento (m/s) na altura de  $zx$ , considerada aqui como a altitude livre da interferência da superfície (200m), na data da imagem utilizada; e  $zom$  é o comprimento do impulso da rugosidade do terreno, que é uma medida de resistência formada pela camada de ar que interage com a superfície. Essa variável pode ser obtida empiricamente, considerando a altura média da vegetação ao redor da estação climatológica ( $h$ ), conforme a equação 22 descrita por Allen et al (2002) com base em Brutsaert (1982).

$$zom = 0,12h \quad (22)$$

Como a área de estudo apresenta grande diversidade de ambientes, relacionados às diferentes categorias de uso da terra e cobertura vegetal, o cálculo de  $Rah$  utilizando o  $zom$  da equação 22 ficou subestimado. Optou-se por calcular o coeficiente de rugosidade a partir do Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI), conforme equação 23 descrita por Bastiaanssen (1995).

$$Zom = \exp(-5,809 + 5,62 * SAVI) \quad (23)$$

Para a obtenção de  $ux$ , foi preciso estimar a velocidade dos ventos para uma altura de 200 metros em relação ao solo, na tentativa de eliminar os efeitos da superfície, conforme equação 24 descrita por Allen et al (2002), onde  $u$  corresponde à velocidade do vento registrada na estação convencional do INMET a 10 metros de altura em relação ao solo.

$$u200 = u * \frac{\ln\left(\frac{200}{Zom}\right)}{k} \quad (24)$$

Deve-se ter muita atenção no cálculo das informações relativas ao coeficiente de rugosidade e à resistência aerodinâmica da superfície, visto que o vento é um elemento climático determinante na determinação do fluxo de calor. É o vento que faz o transporte de calor entre áreas adjacentes pela tendência de estabilidade apresentada pela atmosfera, entre áreas mais quentes para áreas com temperaturas mais baixas. O vento também é responsável pela distribuição da água em formato de vapor entre essas regiões, podendo ser importante no cálculo de perda de efetividade de sistemas de irrigação em determinadas áreas. A subestimação ou superestimação da variável  $R_h$  interfere diretamente nos dados de evapotranspiração real estimados.

Dessa forma, a equação para obtenção do Fluxo de Calor Sensível ( $H$ ) está completa. Com os valores do saldo de radiação à superfície ( $R_n$ ), fluxo de calor no solo ( $G$ ) e fluxo de calor sensível ( $H$ ), torna-se possível calcular o fluxo de calor latente instantâneo, também medido em  $W/m^2$  (equação 25) e, conseqüentemente, os valores para evapotranspiração horária, diária, mensal e sazonal.

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (25)$$

Entende-se como fluxo de calor latente ( $\lambda ET$ ) a taxa de perda de calor latente a partir da superfície ocasionado pela evapotranspiração, podendo ser calculado para cada pixel. Esse valor pode ser convertido para a taxa de evaporação horária ( $ET_h$ ) conforme a equação 26 apresentada por Allen et al (2002).

$$ET_h = 3600 * \lambda ET / \lambda \quad (26)$$

Onde  $\lambda$  corresponde ao calor latente de evaporação (equação 27, dada em  $J/Kg$  e descrita por HARRISSON, 1963) e 3600 é o valor de conversão de segundos para horas (BASTIAANSEN et al, 1998; NICÁCIO, 2008)

$$\lambda = [2,501 - 0,00236 * (T_s - 273,16)] * 10^6 \quad (27)$$

Allen et al (2002), destacam também a necessidade de cálculo da Fração Evaporativa ( $\Lambda$ ), descrita por Bastiaanssen (1998) a partir do fluxo de calor latente, do saldo de radiação e do fluxo de calor no solo (equação 28):

$$\Lambda = \frac{LE}{R_n - G} \quad (28)$$

O conhecimento da fração evaporativa é importante para o cálculo do valor de referência da evapotranspiração ( $E_{TrF}$ , equação 29), definida como a razão entre a evapotranspiração instantânea para cada pixel ( $E_{th}$ ) e a Evapotranspiração de referência ( $E_{To}$ ), proposta pela FAO e calculada a partir de dados meteorológicos como temperatura do ar, velocidade dos ventos, umidade relativa do ar, duração do fotoperíodo e pressão atmosférica. Os dados de Evapotranspiração de Referência foram calculados utilizando o software  $E_{To}$  calculator, disponibilizado para download na página da FAO (<http://www.fao.org/nr/water/eto.html>), a partir dos dados obtidos em estações convencionais do INMET para as mesmas datas das imagens utilizadas.

De acordo com Allen et al (2002), os valores de  $E_{TrF}$  são semelhantes ao coeficiente da cultura ( $K_c$ ), variando de 0 a 1 e ocasionalmente atingindo valores de 1,1, quando a evapotranspiração instantânea for significativamente superior à evapotranspiração de referência. Em testes realizados durante a aplicação do modelo, verificou-se que não existem grandes diferenças nos resultados quando se utiliza a fração evaporativa como evapotranspiração de referência, nem quando  $E_{TrF}$  é substituída pelo coeficiente da cultura mapeada como uso da terra e cobertura vegetal. Os autores ainda destacam que podem ocorrer valores negativos de  $E_{TrF}$  ocasionados por erros em etapas anteriores do modelo, principalmente no cálculo do balanço de energia.

$$E_{TrF} = \frac{E_{th}}{E_{To}} \quad (29)$$

Os valores diários de evapotranspiração ( $ET_{24}$ , equação 30) na maioria das vezes são mais úteis que valores de evapotranspiração horária. De acordo com Allen et al (2002), o SEBAL calcula a evapotranspiração diária assumindo que a  $E_{TrF}$  instantânea é a mesma que a média de 24 horas.

$$ET_{24} = E_{TrF} * E_{To24} \quad (30)$$

Onde  $E_{To24}$  (mm/dia) é o acumulado de  $E_{To}$  em 24 horas para o dia de obtenção da imagem, calculado a partir da soma dos valores de  $E_{To}$  horários ao longo do dia.

Durante a aplicação do modelo foram identificadas dificuldades de estimativa de evapotranspiração diária a partir de dados de evapotranspiração de referência, principalmente em virtude da extensão da área e da escassez de dados meteorológicos para o cálculo da  $E_{To}$ . Os resultados apresentados utilizando essa equação apresentam-se inferiores a valores de

evaporação medidos nas estações convencionais por Evaporímetros de Piché livre da ação de fatores externos, o que indica que os dados possam ser subestimados.

Não encontramos uma forma eficiente para estimar a evapotranspiração mensal, visto que as condições do tempo atmosférico variam muito de um dia para o outro, tornando essa estimativa falha. Se considerarmos valores constantes de ET<sub>24</sub>, podemos estimar a evapotranspiração mensal multiplicando esses valores pelo número de dias do mês, o que pode fornecer uma ideia da variação mensal, porém, não pode ser considerada como valor real.

É possível, no entanto, estimar a evapotranspiração sazonal, que pode ser entendida como um mês, um período de safra ou uma estação, a partir do SEBAL, conforme apontam Allen et al (2002). Essas informações são importantes para o planejamento de atividades agrícolas, pois compreendem toda uma safra. Estes dados podem ser obtidos a partir da evapotranspiração em 24 horas, extrapolando proporcionalmente os valores de referência (ET<sub>o</sub>). Nesse sentido, assume-se que ET<sub>rF</sub> seja constante para todo o período representado. Allen et al (2002) determinam 05 etapas para o cálculo da evapotranspiração sazonal:

1. Definir o intervalo de tempo para o qual se deseja calcular a evapotranspiração;
2. Determinar o período representado por cada imagem de satélite dentro do intervalo escolhido;
3. Calcular a ET<sub>o</sub> cumulativa para o período, somando os valores diários ao longo deste intervalo. Adota-se um tipo de cobertura do solo predominante para a referência. É possível também, utilizando álgebra de mapas, utilizar valores de ET<sub>o</sub> para cada cobertura, refinando os resultados.
4. Calcular a ET cumulativa para cada período (equação 31), considerando n como o número de dias do intervalo.

$$ET_{period} = ETrF_{period} \sum_1^n ET_{o24} \quad (31)$$

5. Calcular a evapotranspiração sazonal pela soma de todos os períodos.

Neste processamento, deve-se observar, ainda:

- a) A cobertura de nuvens na imagem utilizada, não devendo atribuir valores de ET ou ET<sub>rF</sub> para estas áreas;
- b) Caso a imagem apresente uma grande diversidade de ambientes, esta deve ser subdividida em áreas homogêneas com valores próprios de ET<sub>o</sub>;

- c) Caso a imagem apresente áreas irrigadas, deve-se tomar cuidado com a variação da evapotranspiração em dias secos e em dias de irrigação. Para minimizar esse problema, recomenda-se utilizar várias imagens dentro do intervalo escolhido ou, então, aplicar um modelo de balanço hídrico para cada pixel de área irrigada, incluindo precipitação e irrigação como entradas.

Embora apresente grande importância para áreas agrícolas, a evapotranspiração sazonal não foi estimada neste estudo, pois seriam necessárias mais imagens com baixa cobertura de nuvens dentro de um período específico, por exemplo, durante os 3 meses de safra da soja, etc., além de dados climatológicos mais consistentes, principalmente das estações automáticas do INMET que fornecem dados horários. Fica um indicativo de análise para estudos posteriores.

Para a aplicação do modelo, bem como o processamento das imagens e geração dos mapas temáticos, foi utilizado o software ArcGis 10.1® licenciado para o Laboratório de Geoinformação da Universidade Federal de Goiás/Regional Jataí, especificamente com as extensões 3D Analyst, Geoestatistical Analyst Tools e Spatial Analyst Tools.

Inicialmente, foram selecionadas imagens diárias com o mínimo de cobertura de nuvens possível para todos os meses de 2013 (pelo menos 01 imagem por mês), utilizando imagens dos dias 31 de julho (dia juliano 212) e 02 de agosto (dia juliano 214) para calibração do modelo (menor cobertura de nuvens), além de 1 imagem de cada mês do ano de 2013, com o menor percentual de cobertura de nuvens conforme o quadro 2. As imagens, previamente tratadas no MRT, foram adicionadas à tela de trabalho do ArcGis 10.1®, onde os valores dos pixels foram multiplicados por um fator de escala de 0,0001 (ajuste dos números digitais dos pixels). Após a conversão, foi calculado o albedo de superfície utilizando a ferramenta “Raster calculator”, onde criou-se uma equação com matemática de bandas. A mesma ferramenta foi utilizada para o cálculo do NDVI, SAVI e LAI, nesse caso, utilizando apenas as bandas 1 e 2 do MYD09GA.

A emissividade é calculada a partir do Índice de Área Foliar (LAI), calculado pela equação 12 e, de acordo com Allen et al (2002), adota-se um valor de 0,985 caso o índice seja igual ou superior a 3. Para esse estudo, o valor de emissividade utilizado foi de 0,966, calculado a partir do índice de área foliar, inferior a 3,0.

Para o cálculo da temperatura de superfície, em graus Kelvin, utilizou-se o produto MYD11A1, multiplicando por um fator de escala de 0,02 para ajustar os valores dos números digitais. Para transformar os dados de temperatura em graus Celsius, padrão utilizado no Brasil, subtrai-se o valor de 273,15 de cada pixel utilizando a ferramenta Raster Calculator.



**Quadro 2.** Imagens MODIS/AQUA selecionadas para aplicação do modelo SEBAL na bacia do Rio Paranaíba.

<b>Dia juliano</b>	<b>Dia gregoriano</b>	<b>Tiles</b>	<b>Condições do tempo</b>
018	18 de janeiro de 2013	H12V10, H13V10, H13V11	Céu nublado, registro de chuvas em algumas regiões; ventos fracos
045	26 de fevereiro de 2013	H12V10, H13V10, H13V11	Céu parcialmente nublado, registro de chuvas em algumas regiões; ventos fracos
073	12 de março de 2013	H12V10, H13V10, H13V11	Céu parcialmente nublado, registro de chuvas em algumas regiões; ventos moderados
107	17 de abril de 2013	H12V10, H13V10, H13V11	Céu parcialmente nublado, sem registro de chuvas; ventos moderados
123	03 de maio de 2013	H12V10, H13V10, H13V11	Céu parcialmente nublado, sem registro de chuvas; ventos moderados
164	13 de junho de 2013	H12V10, H13V10, H13V11	Poucas nuvens, sem registro de chuvas; ventos moderados
212	31 de julho de 2013	H12V10, H13V10, H13V11	0% de cobertura de nuvens, período de estiagem superior a 30 dias na região; ventos moderados, com rajadas.
214	02 de agosto de 2013	H12V10, H13V10, H13V11	0% de cobertura de nuvens, período de estiagem superior a 30 dias na região; ventos moderados, com rajadas.
269	26 de setembro de 2013	H12V10, H13V10, H13V11	Poucas nuvens, sem registro de chuvas; ventos moderados, com rajadas.
283	10 de outubro de 2013	H12V10, H13V10, H13V11	Céu parcialmente nublado, sem registro de chuvas; ventos moderados
331	27 de novembro de 2013	H12V10, H13V10, H13V11	Céu parcialmente nublado, registro de chuvas em algumas regiões; ventos fracos
338	04 de dezembro de 2013	H12V10, H13V10, H13V11	Céu nublado, registro de chuvas em algumas regiões; ventos fracos

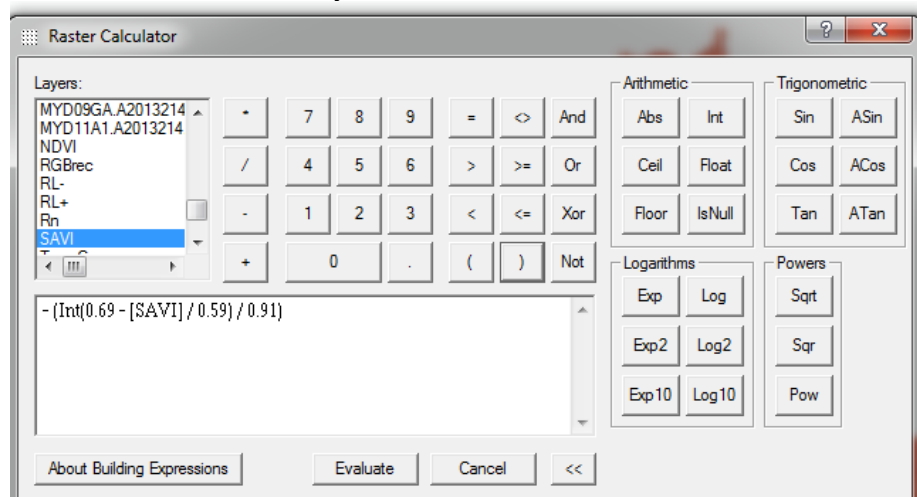
**Fonte:** NASA, 2014; BDMEP/INMET, 2014.

Com os dados de emissividade e temperatura de superfície, calcula-se a radiação de onda longa emitida pela superfície, conforme equação 8. Dessa forma, parte da equação para obtenção do saldo de radiação à superfície está resolvida, resta calcular as radiações de onda curta e longa que chegam à superfície, sendo a primeira um valor numérico para o qual não é necessária a matemática de bandas.

Após calcular o balanço de radiação à superfície, inicia-se a segunda fase do trabalho, que visa identificar os valores de fluxo de calor no solo, fluxo de calor sensível, calor latente e evapotranspiração. Todas essas etapas foram realizadas com a ferramenta Raster Calculator da extensão Spatial Analyst Tools do ArcGis10.1®, onde deve-se tomar cuidado em colocar

parênteses nas expressões para que as equações sejam executadas com precisão, conforme exemplo da figura 2, com o cálculo do Índice de Área Foliar.

**Figura 2.** Exemplo de construção de equação na ferramenta Raster Calculator da extensão Spatial Analyst Tools do ArcGIS® 10.1.



O cálculo do fluxo de calor sensível exige informações como velocidade dos ventos, que devem ser obtidas em estações climatológicas, além de exigir uma maior atenção no cálculo da variável “dT”, especificada na equação 19 e que exige a determinação de dois coeficientes a e b, funções calculadas a partir da escolha de pixels quente e frio.

Após a geração das imagens classificadas, passou-se ao processo de reclassificação pela ferramenta reclassify, também da extensão Spatial Analyst Tools adotando classes com intervalos definidos manualmente a partir da amplitude apresentada, de forma que as informações ficassem bem representadas e permitissem comparações espaciais e temporais. Não foi definida uma quantidade de classes padrão, pois os dados apresentam amplitudes muito diferentes, podendo ser incorretamente representados caso fossem fixados valores padrão. O esquema de cores dos mapas temáticos foi padronizado de acordo com o espectro eletromagnético, sendo os valores mais baixos representados pela cor violeta e os valores mais altos pelo vermelho, exceto para os mapas de NDVI, elaborados em escala de verde, e para os mapas de evapotranspiração, melhor representados com a escala de cores do espectro invertida.

O mapa de uso da terra e cobertura vegetal foi elaborado para a imagem de abril de 2013 (MYD09A1 em composição de 08 dias, sem cobertura de nuvens) a partir das bandas 1, 2 e 7 em composição 7R2G1B (os resultados também são satisfatórios com o uso da banda 5 no lugar da banda 7). As imagens, já georeferenciadas, foram convertidas em formato “tif” e resolução de 8 bits e posteriormente classificada, inicialmente, de forma não-supervisionada pela

ferramenta “multivariate-isocluster” do Spatial Analyst Tools (segmentação), com detalhamento de 5 níveis de cinza para áreas de 3 pixels, com 60 classes que posteriormente foram reclassificadas em 06: corpos d’água, pastagens, área urbana, agricultura/silvicultura, solo descoberto, cerrado e floresta (vegetação natural/área de preservação) em processo de reclassificação visual. Posteriormente, as áreas de agricultura e solo descoberto foram agrupadas, visto que ambas representam áreas destinadas às práticas agrícolas.

Para a classificação, foi utilizado o método de máxima verossimilhança (ferramenta multivariate – maximum likelihood classification do Spatial Analyst Tools), atribuindo-se pesos iguais para as classes e com margem de acerto de 95%. Não foi possível, pela resolução espacial das imagens utilizadas, delimitar áreas de agricultura irrigada e silvicultura, sendo todas agrupadas com as áreas de produção agrícola. Durante a calibração e teste do modelo, essas áreas foram visualizadas no Google Earth, auxiliando no processo de reclassificação e correção. Além do mapa elaborado a partir das mesmas imagens utilizadas para estimativa de evapotranspiração, foram utilizados o mapa de uso disponibilizado no Plano de Recursos Hídricos do Rio Paranaíba (ANA, 2013) e o mapa elaborado por ROSA e SANO (2014) com imagens TM/Landsat de 2010 para comparação dos resultados.

Assessorialmente, elaborou-se um mapa hipsométrico a partir de imagens SRTM/NASA com resolução de 90 metros para identificar pontos mais elevados e com altitudes mais baixas, que permitiram o cálculo da transmissividade, além de permitir uma análise comparativa dos resultados de acordo com as cotas altimétricas.

As imagens temáticas foram convertidas para polígonos, que foram agrupados e cruzados com outras informações por tabulação cruzada (Extensão Spatial Analyst Tools – Zonal – Tabulate areas), permitindo uma análise mais aprofundada do comportamento das variáveis mapeadas em relação à altitude e aos tipos de uso da terra e cobertura vegetal.

Apesar de o software utilizado na pesquisa necessitar de pagamento de licenças de uso, o processamento do modelo SEBAL pode ser realizado em softwares de download livre, como o SPRING e o QuantumGIS, embora esses softwares exijam uma habilidade maior do pesquisador para compor as programações com as equações do algoritmo. Durante a execução dessa pesquisa, aconteceram várias tentativas de realizar as programações por álgebra de mapas (ferramenta LEGAL) no SPRING 5.2, mas as tentativas não tiveram êxito devido a uma série de erros de processamento e “bugs” apresentados pelo software.

Mesmo com o número crescente de pesquisas na área dentro dos cursos de graduação e pós-graduação em Geografia, Meteorologia, Engenharia Ambiental, Agronomia, entre outros,

percebe-se que a quantidade de referências ainda é escassa, sendo que a maioria remete aos autores que desenvolveram o modelo, sem maiores contribuições para a realidade dos diversos biomas brasileiros. É preciso estudar formas de inserir outras informações que interferem na dinâmica da água na superfície, especialmente informações de precipitação, tipos e estrutura de solos, fundamentais ao estudo do ciclo hidrológico. Percebe-se, também, que é preciso explorar melhor o potencial que as imagens do sensor MODIS oferecem para estudos relacionados às mudanças ambientais regionais e globais, principalmente em áreas mais extensas, biomas, territórios estaduais, grandes bacias hidrográficas, etc.

### 3. ANÁLISE AMBIENTAL INTEGRADA DA BACIA DO RIO PARANAÍBA

A Revolução Industrial, no século XVIII, introduziu o uso da água no processo de transformação da matéria-prima em produtos industrializados, aumentando a demanda por este recurso. A partir desse período, a população mundial aumentou rapidamente, o que também aumentou a demanda de água para uso doméstico, para a produção de alimentos e para a produção industrial graças ao aumento do consumo, o que não foi acompanhado por um programa de conscientização ambiental e de conservação dos recursos naturais, principalmente da água.

No campo, a Revolução Verde, amplamente discutida por Brum (1988), introduziu o uso em larga escala de insumos agrícolas como máquinas, fertilizantes, agrotóxicos, etc., além de modernas técnicas de irrigação que, com a mesma proporção que aumentaram a produção comercial de alimentos, aceleraram o processo de degradação dos Recursos Hídricos, seja pelo uso sem controle na irrigação, seja pela poluição dos cursos d'água e lençóis subterrâneos, ou mesmo pelo mau uso do solo, causando processos erosivos e, conseqüentemente, o assoreamento dos cursos d'água. Essas mudanças nos padrões de uso da terra e a redução da cobertura vegetal natural alteram, em escala regional, o ciclo hidrológico ao mudar os padrões de evapotranspiração, além de alterar a dinâmica de infiltração e percolação de água nos solos.

Atualmente, muito se discute sobre a necessidade de adoção de parâmetros, modelos e unidades de estudo “ideais” para atividades de planejamento, uso e gestão dos recursos hídricos, discussão que adquire grande respaldo na legislação ambiental e de recursos hídricos do país. O primeiro passo neste longo caminho em direção à sustentabilidade do atual sistema produtivo é entender a estrutura e o funcionamento dos diversos sistemas que compõem o ambiente.

Neste sentido, muitos autores, entre eles Bertrand (1972), Bertalanffy (1973) e Christofolletti (1980), trabalham com o conceito de “Sistema” para justificar que a natureza (entendida como um organismo) desempenha funções interdependentes, tanto em situações de estabilidade como de desequilíbrio. Dessa forma, impactos e medidas preventivas ou paliativas devem ser pensados como relações de causa-efeito em uma visão mais abrangente, onde qualquer alteração pontual pode vir a interferir em áreas adjacentes, transmitindo os impactos em velocidade difícil de prever ou controlar. Segundo Moragas (2005, p.22),

o paradigma sistêmico se orienta não somente pela hierarquização dos níveis mas pela integração destes níveis em um todo. Para isso, torna-se necessário estabelecer o entendimento sobre formas, estruturas, funções, fluxos e armazenagem de energia e matéria.

Bertrand (1972), ao trabalhar com o conceito de geossistema, afirma que a combinação de elementos físicos, biológicos e antrópicos atribuem à paisagem uma característica de conjunto, indissociável e em evolução permanente. Adaptando esta visão sistêmica à metodologias de estudo em bacias hidrográficas, os elementos de entrada seriam representados pela precipitação pluvial e seus fluxos (infiltração e escoamento), o solo e a estrutura geológica como armazenadores e condutores dos fluxos e a saída, pelos processos de evapotranspiração e pela vazão final, perpassando por processos de transporte e uso que provocam “perdas” ou “desvios” relativos de matéria (água). Isso caracteriza a bacia hidrográfica como um sistema aberto, de fundamental interesse, que permite “reconhecer e estudar as inter-relações existentes entre os diversos elementos da paisagem e os processos que atuam na sua esculturação”, representando também uma “unidade ideal de planejamento de uso das terras” (BOTELHO, 1999, p.269).

Com base nos estudos de Lima (1999), Attanasio (2004, p.29) argumenta que as bacias hidrográficas constituem

a manifestação bem definida de um sistema natural aberto e pode ser vista como a unidade ecossistêmica da paisagem em termos da integração dos ciclos naturais de energia, de nutrientes e, principalmente, da água. Dessa forma, ela apresenta uma condição singular e conveniente de definição espacial do ecossistema, dentro do qual é possível o estudo detalhado das interações entre o uso da terra e a quantidade e qualidade da água produzida.

Ainda no que diz respeito aos paradigmas conceituais que fundamentam os estudos em bacias hidrográficas, além da visão sistêmica, utiliza-se pressupostos das ciências naturais, como os trabalhados pela Geografia da Paisagem ou pela Ecologia da Paisagem, originadas no século XIX nos estudos de Alexander Von Humboldt, grande pioneiro da Geografia Física moderna. O termo “Ecologia da Paisagem”, segundo Valente (2003, p.21) foi trabalhado, pela primeira vez, por Carl Troll (1939), enquanto estudava problemas de uso da terra e o desenvolvimento do oeste da África, ao imaginar a revolução que o uso de fotografias aéreas traria ao estudo das paisagens.

A dissociação homem-natureza iniciada no período das grandes navegações (século XV), séculos mais tarde impulsionada pelas inovações tecnológicas trazidas pela Revolução Industrial e pelo modelo de “desenvolvimento a qualquer custo” baseado no “American way of life”, já no século XX, fez com que o ambiente sofresse uma pressão até então desconhecida, levando à desestabilidade dos sistemas naturais.

A reaproximação entre homem e meio e a centralização das atenções de geógrafos e cientistas naturais nos desdobramentos da relação entre sociedade e natureza é algo recente, que data da segunda metade do século XX.

Quando o objeto da Geografia passou a ser a relação homem-meio (natureza) (...) o espaço geográfico deixou de ser pensado segundo as formas físicas e passou a ser visto como o resultado das formas como os homens organizam sua vida e suas formas de produção. A Geografia concebe a relação natureza-sociedade sob o ponto de vista da apropriação, a natureza como recurso à produção. (VINAUD, 2008 p. 28)

Considerado o “Pai das Águas”, é no cerrado que se localizam grande parte das nascentes que originam as principais bacias hidrográficas do país (Rio São Francisco, Rio Paraná, Rio Araguaia, Rio Tocantins, entre outros), cujos córregos, ribeirões e rios correm, em grande parte, nas grandes áreas planas com declividades inferiores a 10%, entremeadas por veredas e covaais, onde aflora o lençol freático e surgem as nascentes. São também as áreas que oferecem condições favoráveis ao desenvolvimento de lavouras comerciais, permitindo o uso intenso de maquinário agrícola e técnicas de irrigação, principalmente por pivô central, além de abrigar extensas áreas de pastagem, tornando o cerrado brasileiro uma das mais importantes regiões de produção de carne, leite, grãos e energia da América do Sul.

No caso específico da área deste estudo (Bacia do Rio Paranaíba), ao ser entendida como um sistema, há que se considerar no processo de avaliação integrada e, conseqüentemente, na proposição de planos de gestão, que se trata de um sistema de uso predominantemente agropecuário, cujas águas são responsáveis por abastecer municípios que figuram entre os maiores produtores de grãos e de cana-de-açúcar do Brasil, além do intenso aproveitamento hidroelétrico cuja energia abastece grande parte do centro-sul do país.

A adoção de bacias hidrográficas como unidades de estudo e planejamento foi regulamentada pela Política Nacional de Recursos Hídricos (1997) que, entre seus princípios fundamentais, confere às bacias hidrográficas a condição de unidade físico-territorial de planejamento.

Assim, torna-se imprescindível a elaboração de diagnósticos ou, numa visão mais avançada, de um processo de avaliação integrada, proposição de Tucci e Mendes (2006), que pressupõe que a etapa de diagnóstico vá muito além da simples descrição dos elementos que compõe o sistema “Bacia Hidrográfica”, exigindo que se estabeleça relações coerentes entre estes elementos para que, assim, os problemas possam ser mais bem entendidos e mais eficientemente solucionados. De acordo com Santos (2008, p.31),

O diagnóstico visa ao desenvolvimento sustentável, para prevenção e correção de prováveis impactos ambientais, indesejáveis do ponto de vista econômico, social e ecológico. Realizado em bacias hidrográficas, tem auxiliado no ordenamento do uso e ocupação da paisagem, observados a partir das aptidões existentes no local e a sua distribuição espacial.

Os conceitos e metodologias de trabalhos pautados na Avaliação Ambiental Integrada de Bacia Hidrográfica foram baseados na obra homônima de Tucci e Mendes (2006), que a definem como

um processo interdisciplinar e social, ligando conhecimento e ação no contexto de decisão pública, para a identificação, análise e avaliação de todos os relevantes processos naturais e humanos e suas interações com atual e futuro estado da qualidade do meio ambiente e recursos nas apropriadas escalas de tempo e espaço, assim facilitando a definição e implementação de políticas e estratégias.

A Avaliação Ambiental Integrada (AAI) é uma ferramenta que pode ser utilizada pela AAE (Avaliação Ambiental Estratégica) na identificação dos impactos e na avaliação dos cenários propostos em suas políticas, planos e programas. A AAI na bacia hidrográfica trata de estudar os impactos ambientais previstos nas Políticas, Planos e Programas previstos para o desenvolvimento da bacia hidrográfica e avaliados no AAE. O que distingue uma avaliação da outra é que a AAI é a análise ambiental de cenários e impactos na bacia dentro das políticas existentes ou planejadas e a AAE envolve além da avaliação integrada a compatibilização das políticas, planos e programas de gestão dos usos e da conservação dos recursos naturais de um território. (TUCCI e MENDES, 2006, p. 246)

A caracterização do meio físico e dos ecossistemas terrestres poderá contemplar, segundo Tucci e Mendes (2006, p. 247):

- a) As unidades geológicas e geomorfológicas, identificando a dinâmica superficial da bacia, suas principais feições, grau de estabilidade e suas formas erosivas e deposicionais;
- b) Caracterização do solo da bacia, descrevendo a aptidão agrícola e silvicultural e diferentes tipos e níveis de susceptibilidade à erosão;
- c) caracterização das diferentes formações vegetacionais e demais ecossistemas presentes, considerando seus estados de conservação (...);
- d) Caracterização dos sedimentos, da fauna e flora de áreas representativas da bacia, destacando os aspectos relevantes relacionados à biodiversidade ao nível das diferentes formações vegetais e demais ecossistemas presentes e seus estados de conservação (...);
- e) Áreas de sensibilidade ambiental, unidades de conservação e demais áreas protegidas por legislação específica.

As técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento, ao interagirem em um ambiente SIG, tornam-se ferramentas importantes no processo de gestão e manejo de bacias hidrográficas, por permitirem a representação precisa de dados espaciais em um ambiente interativo que oferece múltiplos recursos, seja na etapa de levantamento de dados e

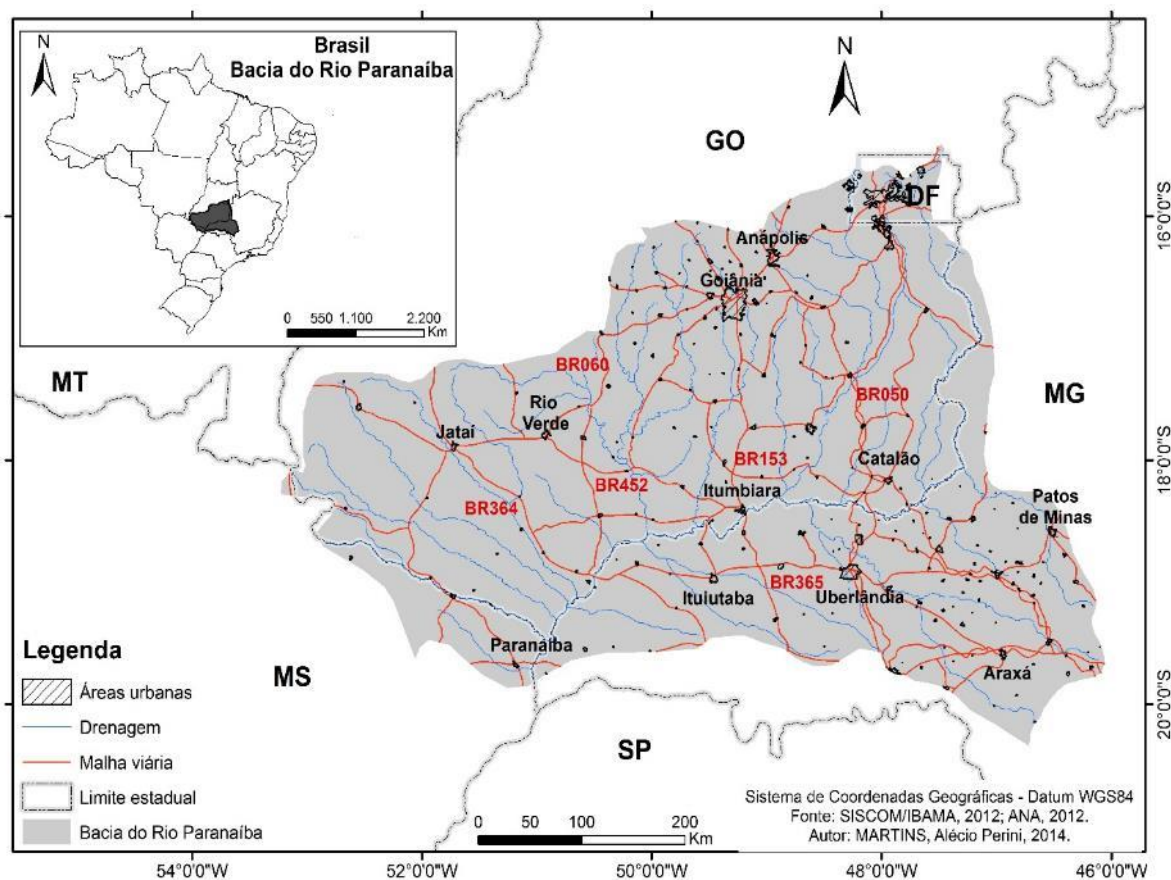


diagnósticos, ou na análise e leitura destes dados, auxiliando ainda em atividades de monitoramento e previsão de situações futuras,

Atividades de planejamento, uso e gestão são possíveis apenas quando se parte de uma realidade conhecida. Suposições vãs sobre áreas hipotéticas, na maioria das vezes, resultam em modelos inaplicáveis. A fase de diagnóstico das características socioambientais é fundamental a qualquer processo de planejamento e gestão de recursos hídricos no nível da bacia hidrográfica. Neste capítulo, propõe-se uma abordagem que transcende o puro e simples levantamento de características físicas e ambientais. O que se propõe aqui é a realização de uma avaliação ambiental integrada, considerando a bacia hidrográfica como um todo, com seus elementos fortemente interligados, sendo que qualquer alteração em um destes componentes pode alterar todos os outros em uma espécie de reação em cadeia.

A área escolhida para as experimentações da pesquisa é representada pela Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba (Mapa 1), um dos principais afluentes da Bacia do Rio Paraná, com área aproximada de 230.000 km<sup>2</sup>.

**Mapa 1.** Localização da área de estudo.



**Fonte:** Agência Nacional de Águas. 2012.

**Autor:** MARTINS, Alécio Perini, 2014.

A Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba apresenta uma diversidade de ambientes extremamente interessantes para estudos ambientais, permitindo que a caracterização e análise da dinâmica destes ambientes possam ser realizadas com o uso de ferramentas de sensoriamento remoto e geoprocessamento e, além disso, possibilitando a aplicação e experimentação de metodologias alternativas e pouco estudadas e/ ou difundidas até então. Como exemplo, destacam-se os diferentes usos da terra identificados, que apresentam comportamentos distintos em relação à variação sazonal dos índices de vegetação, temperatura de superfície, fluxo de calor no solo e evapotranspiração.

A bacia do rio Paranaíba é a segunda maior unidade da Região Hidrográfica do Paraná, ocupando 25,4% de sua área (...). Posicionada na região central do Brasil, ocupa cerca de 2,6% do território nacional e inclui os estados de Goiás (63,3%), Mato Grosso do Sul (3,4%) e Minas Gerais (31,7%), além do Distrito Federal (1,6%). A bacia possui 197 municípios, além do Distrito Federal. Destes, 28 sedes municipais se encontram fora dos limites da bacia (ANA, 2013)

Todos os mapas que compõem esta caracterização foram elaborados no software ArcGis 10.1® Licenciado para o Laboratório de Geoinformação da Universidade Federal de Goiás – Regional Jataí, utilizando principalmente ferramentas das extensões 3D Analyst, Spatial Analyst Tools e ferramentas de análise, manipulação e gerenciamento de dados do pacote básico do software.

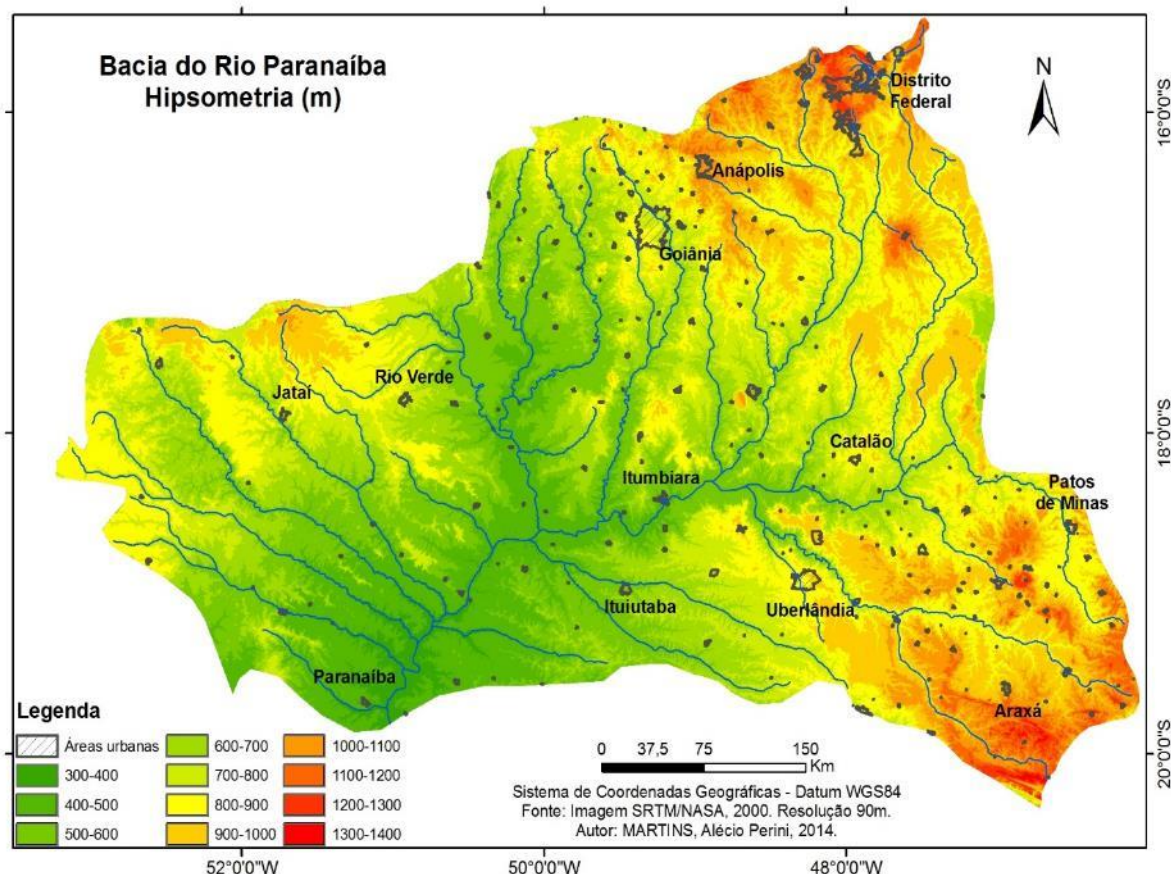
As bases relativas às características do meio físico foram adquiridas em bibliotecas virtuais de órgãos governamentais como Agência Nacional de Águas (ANA), Ministério do Meio Ambiente (MMA), Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e órgãos estaduais como o Instituto Mauro Borges (IMB) e o Sistema Estadual de Geoinformação de Goiás (SIEG). Para elaboração dos mapas de hipsometria e declividade foram utilizadas imagens do SRTM/NASA do ano de 2000, disponibilizadas pela EMBRAPA em escala de 1:250.000 e resolução de 90m, sendo necessárias 22 imagens para recobrir toda a área de estudo. Os mapas finais de caracterização do meio físico foram gerados em formato A4, com escala de 1:3.000.000.

O mapa de uso da terra e cobertura vegetal foi elaborado para a imagem de abril de 2013 (MYD09A1 em composição de 8 dias, sem cobertura de nuvens) a partir das bandas 1, 2 e 7 em composição 7R2G1B. As imagens, já georeferenciadas, foram convertidas em formato “.tif” e resolução de 8 bits e posteriormente classificada, inicialmente, de forma não-supervisionada (segmentação) pela ferramenta “multivariate-isocluster” do Spatial Analyst Tools, com

detalhamento de 5 níveis de cinza para áreas de 3 pixels, com 60 classes. Posteriormente, foram reclassificadas em 06: corpos d'água, pastagem, área urbana, agricultura/silvicultura, solo descoberto, cerrado e floresta (vegetação natural/área de preservação) em processo de classificação visual. Para a classificação foi utilizado o método de máxima verossimilhança (ferramenta multivariate – maximum likelihood classification do Spatial Analyst Tools), atribuindo-se pesos iguais para as classes e com margem de acerto de 95%.

A partir do mapeamento elaborado e de informações do Plano de Recursos Hídricos do Rio Paranaíba (ANA, 2013), observa-se uma grande amplitude altimétrica com altitudes variando de 240m na confluência do Rio Paranaíba com o Rio Grande até cotas superiores a 1300m nas nascentes localizadas no Distrito Federal e nas nascentes do Rio Araguari (mapa 2).

**Mapa 2.** Variação hipsométrica (em metros) na Bacia do Rio Paranaíba.



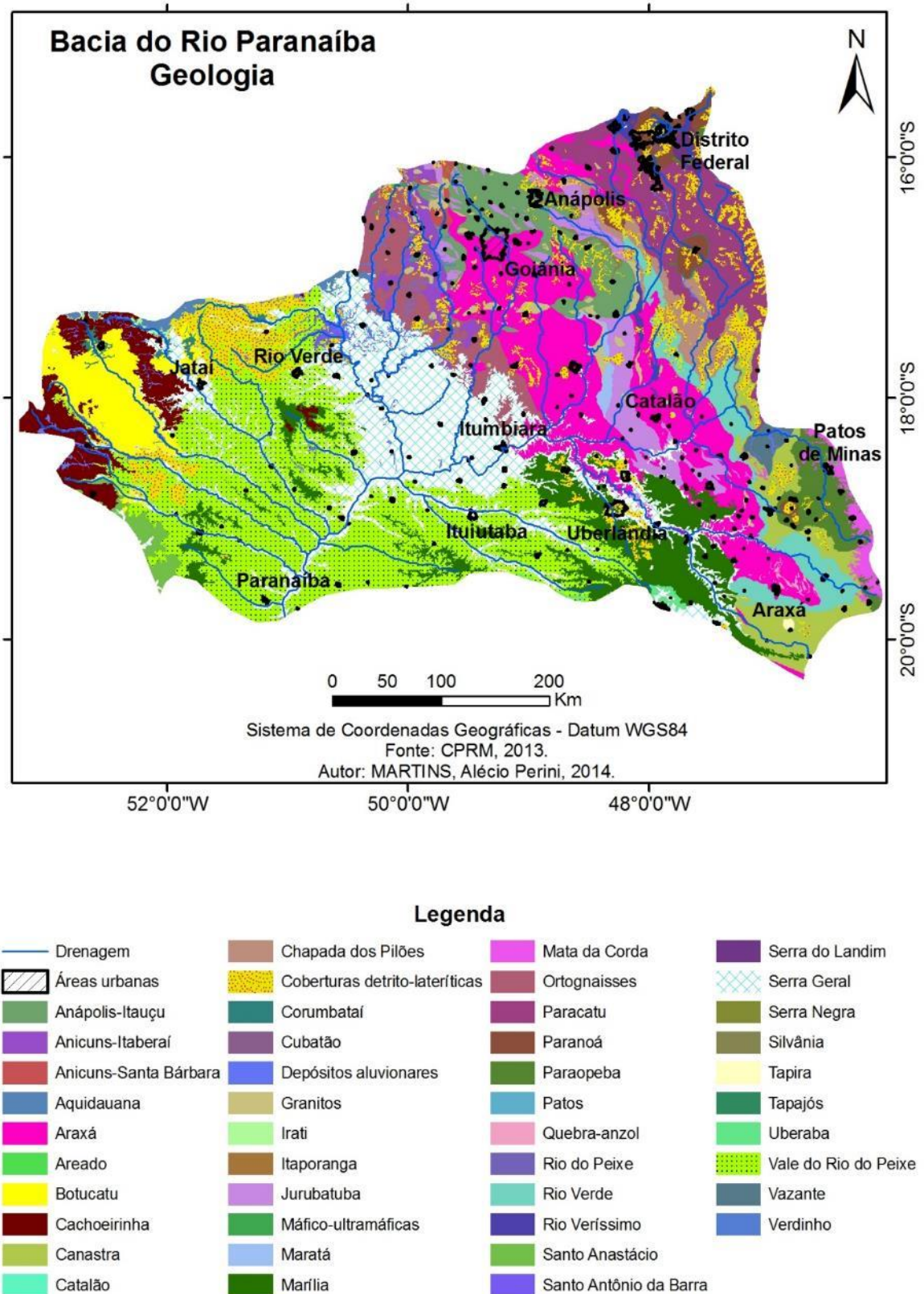
**Fonte:** EMBRAPA – Imagem SRTM/NASA, 2000.

**Autor:** MARTINS, Alécio Perini, 2014.

As áreas de maior altitude encontram-se na Província Tocantins, cujo embasamento geológico é representado principalmente por grupos e formações muito antigas, compostas por rochas cristalinas, predominantemente metamórficas. Destacam-se os Grupos Araxá, Canastra e Paranoá (mapa 3).



**Mapa 3.** Principais formações geológicas encontradas na Bacia do Rio Paranaíba.



**Fonte:** CPRM, 2013.

**Organização:** MARTINS, Alécio Perini, 2014

Entre as principais bacias hidrográficas com nascentes nessa região, destacam-se os afluentes do alto curso do Rio Paranaíba (mapas 4 e 5), como os Rios São Marcos, Veríssimo, Corumbá, Dourados e Araguari (Quebra-Anzol). 22% da área de estudo apresenta altitudes superiores a 1000m, mesmo percentual de área ocupado pelas formações geológicas que integram a província Tocantins.

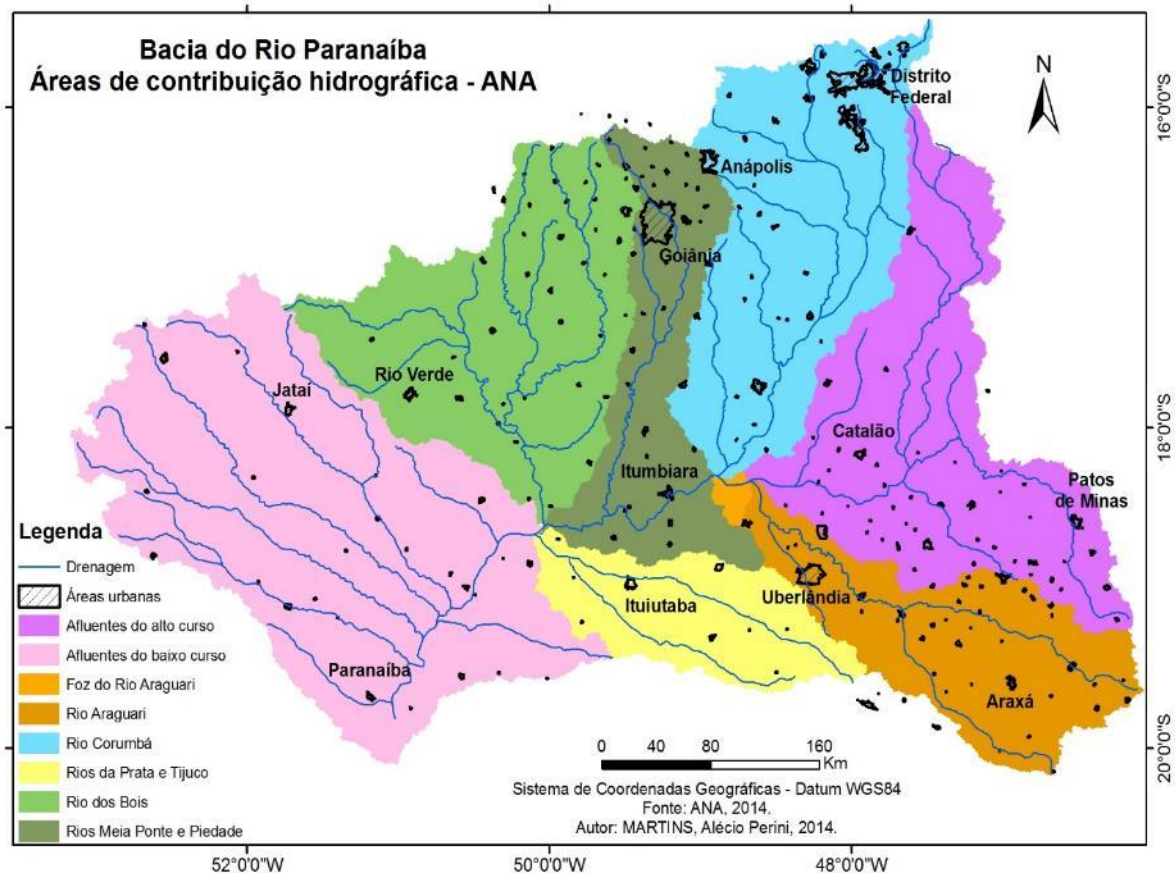
Nessas áreas, predominam solos mais rasos e com menor fertilidade, como é o caso dos Cambissolos, representados pela cor marrom no mapa 6 (17% da área total). São solos fortemente drenados, com horizonte B incipiente e textura franco-arenosa, com teores uniformes de argila. São observados nessas áreas, ainda, os Argissolos, que também ocorrem em áreas próximas ao canal do Rio Paranaíba e afluentes do médio e baixo curso e se caracterizam pela presença de horizonte B diagnóstico, com acúmulo de argila em profundidade (EMBRAPA, 2006). Normalmente apresentam acidez elevada, encontram-se associados às áreas com declividade mais forte e recobrem aproximadamente 15% da área total da bacia.

As porções do médio e baixo curso do rio Paranaíba (56% da área), encontram-se recobertas por Latossolos que, apesar de algumas restrições relacionadas à fertilidade, apresentam características que os tornam ideais para o desenvolvimento de práticas agrícolas por serem profundos, porosos, bem drenados, apresentarem boa estruturação e possibilidades de correção de fertilidade. Associados às áreas de relevo plano e suavemente ondulado, se tornam ideais para o desenvolvimento de agricultura mecanizada.

Ainda são encontradas na bacia áreas cobertas por Neossolos (litólicos, nas áreas com relevo mais acidentado e quartzarênicos, associados a formações areníticas no sudoeste de Goiás e nordeste do Mato Grosso do Sul) que representam 8% da área total, além Gleissolos (3%) e áreas cobertas por espelho d'água (1%).

Já nos afluentes do médio e baixo curso do Rio Paranaíba predominam formações da Província Paraná, com destaque para o Grupo Bauru, composto exclusivamente por formações sedimentares de arenitos, argilitos e conglomerados (Formações Vale do Rio do Peixe e Marília) e Grupo São Bento (Formações Botucatu e Serra Geral). Essas áreas, que representam 42% da bacia do Rio Paranaíba, localizam-se em cotas altimétricas mais baixas, em sua maioria inferiores a 800 metros (41% da área total apresenta altitudes abaixo de 800 metros) e abrangem áreas de contribuição hidrográfica dos afluentes do baixo curso: Rio Santana, no Mato Grosso do Sul; Rios Aporé, Corrente, Verde, Claro, Preto, dos Bois e Meia Ponte em Goiás; Rios Tijuco, da Prata, Piedade e Arantes, em Minas Gerais.

**Mapa4.** Principais áreas de contribuição hidrográfica da Bacia do Rio Paranaíba, segundo divisão da Agência Nacional de Águas e o Plano de recursos hídricos da bacia.



**Fonte:** ANA, 2013.

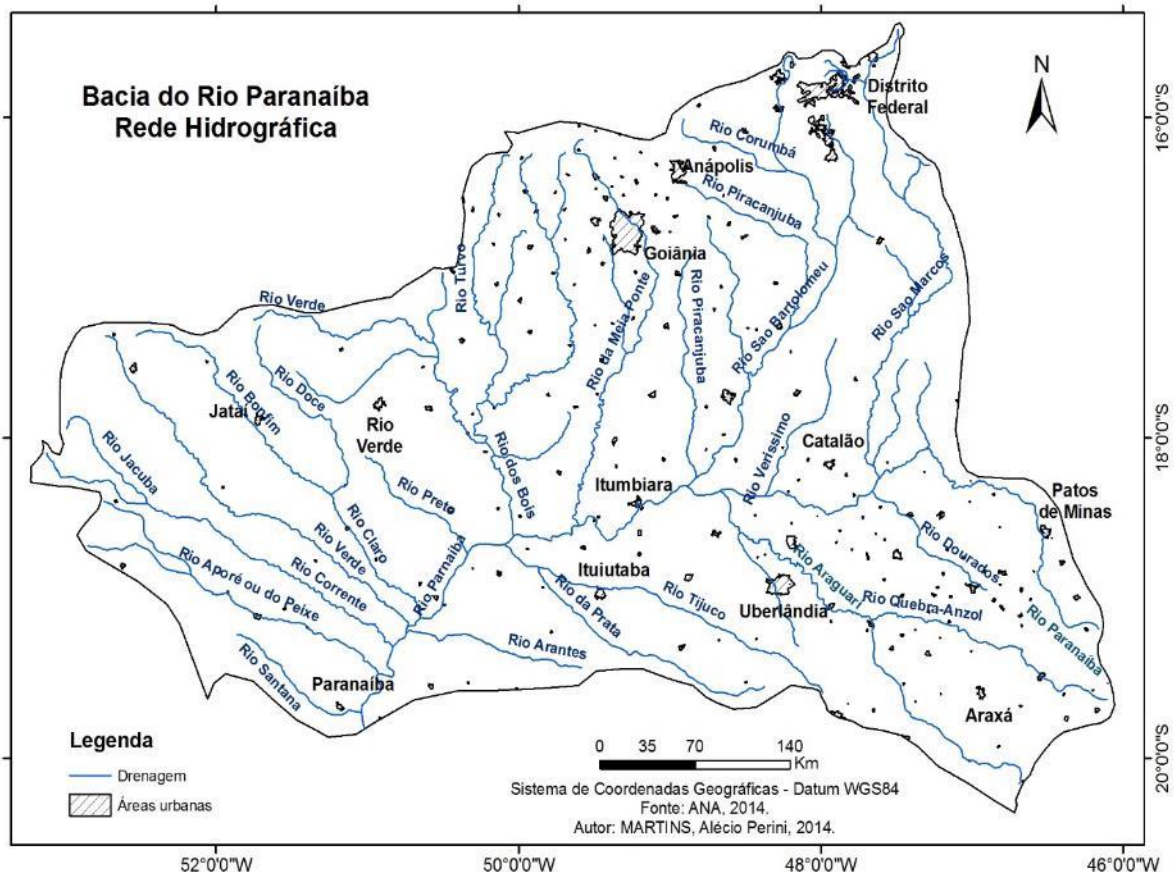
**Organização:** MARTINS, Alécio Perini, 2014.

Em alguns cursos d'água, o potencial de escavação das águas fluviais, bem como a dinâmica geomorfológica local, expõe estruturas pertencentes ao Grupo São Bento, como a Formação Serra Geral, representada por sucessivas camadas de derrame basáltico, e a Formação Botucatu, observada principalmente nos municípios de Jataí, Serranópolis e Mineiros (Goiás), representada pelo Arenito Botucatu que compõe o Aquífero Guarani. Outras formações comuns nessas áreas do médio/baixo curso encontram-se em cotas altimétricas entre 800 e 1000m e são representadas por formações sedimentares inconsolidadas da Formação Cachoeirinha e de Coberturas detrítico-lateríticas (11% da área). As demais formações geológicas ocupam 25% da área total da bacia e encontram-se distribuídas em diferentes cotas altimétricas e representam estruturas de ocorrência pontual.

Quanto ao relevo, é possível observar no mapa 7 que a área apresenta-se predominantemente plana, com declividades inferiores a 12% e, dessa forma, sem maiores restrições para a maioria das atividades agropecuárias que utilizam mecanização. As áreas com

maiores inclinações encontram-se associadas ao Planalto Central Goiano e às formações geológicas que compõem a Província Tocantins, variando de inclinações de 12% até superiores a 50% em encostas.

**Mapa 5.** Principais cursos d'água que compõem a rede hidrográfica da Bacia do Rio Paranaíba



**Fonte:** ANA, 2013.

**Organização:** MARTINS, Alécio Perini, 2014.

O desenvolvimento de atividades agropecuárias deve ser planejado com cuidado nas áreas que apresentam inclinações superiores a 12% e solos com maior fragilidade, como Neossolos, Cambissolos e Argissolos, por estarem mais susceptíveis à erosão. Por se tratarem de solos predominantemente arenosos, a agregação das partículas é mais fraca, podendo ser facilmente carreadas para os cursos d'água causando assoreamento de canais fluviais e colocando em risco as dezenas de represas e lagos de hidrelétricas presentes na região.

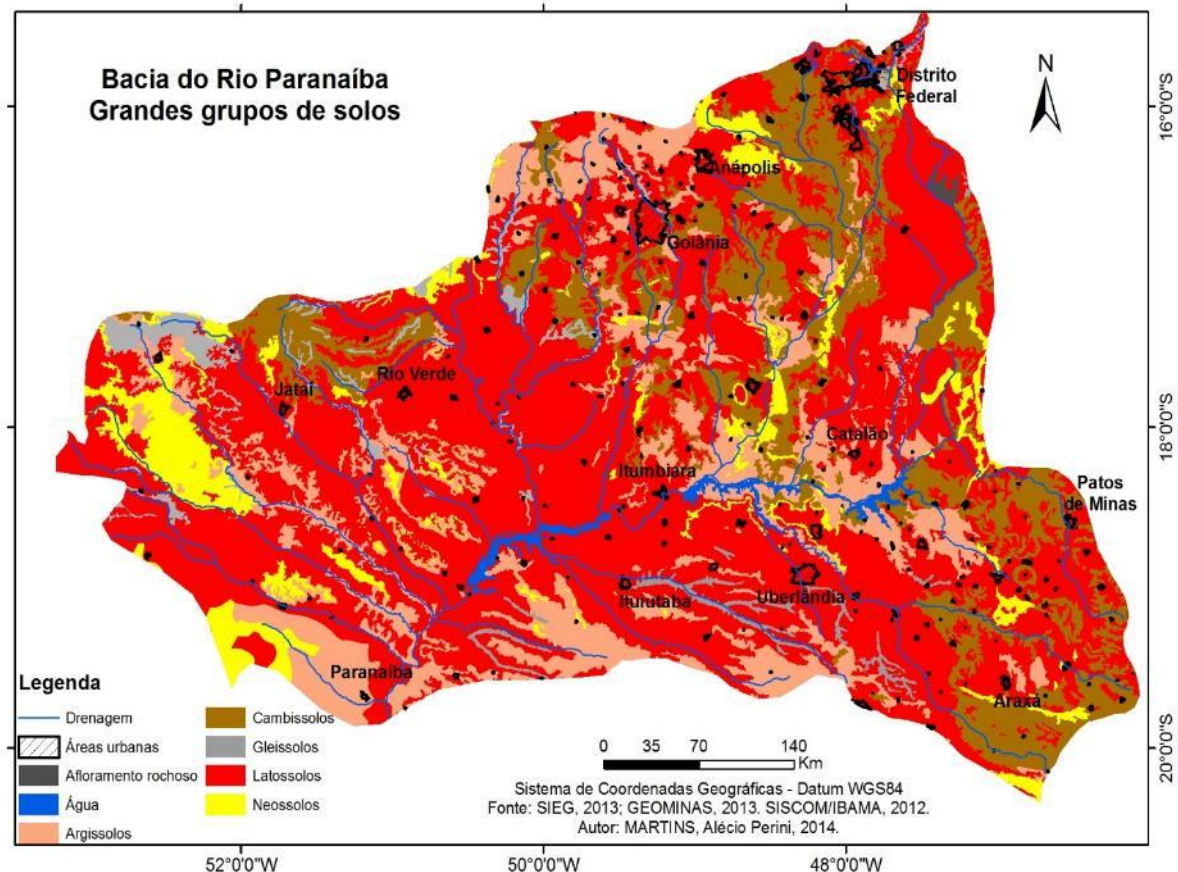
Do ponto de vista geomorfológico, são definidos dois conjuntos de relevo na bacia do rio Paranaíba: o Planalto Central Goiano e o Planalto Setentrional da Bacia do Paraná. O primeiro compreende o Planalto do Distrito Federal e Planalto Rebaixado de Goiás, no domínio das rochas metamórficas e metassedimentares. O segundo representa a região dos planaltos areníticos-



basálticos interiores e é subdividido no Planalto (Chapadão) do Rio Verde e Planalto Rebaixado da Bacia do Paraná (ANA, 2013, p.43).

Originalmente, a área encontrava-se recoberta por feições de cerrado e residuais de floresta estacional que, após mais de três séculos de ocupação, hoje encontram-se restritas às áreas de preservação permanente às margens dos cursos d'água, reservas legais, encostas e algumas áreas de conservação como Áreas de Proteção Ambiental (APA's) e Reservas Particulares do Patrimônio Natural (RPPN's). Existem apenas três áreas federais de preservação na Bacia do Rio Paranaíba, sendo que apenas o Parque Nacional das Emas, no extremo oeste de Goiás, encontra-se totalmente inserido na área. Destacam-se, ainda, os parques nacionais de Brasília e da Serra da Canastra, parcialmente inseridos na área da bacia.

**Mapa 6.** Principais grupos de solos encontrados na bacia do Rio Paranaíba.



**Fonte:** EMBRAPA, 2014.

**Organização:** MARTINS, Alécio Perini, 2014.

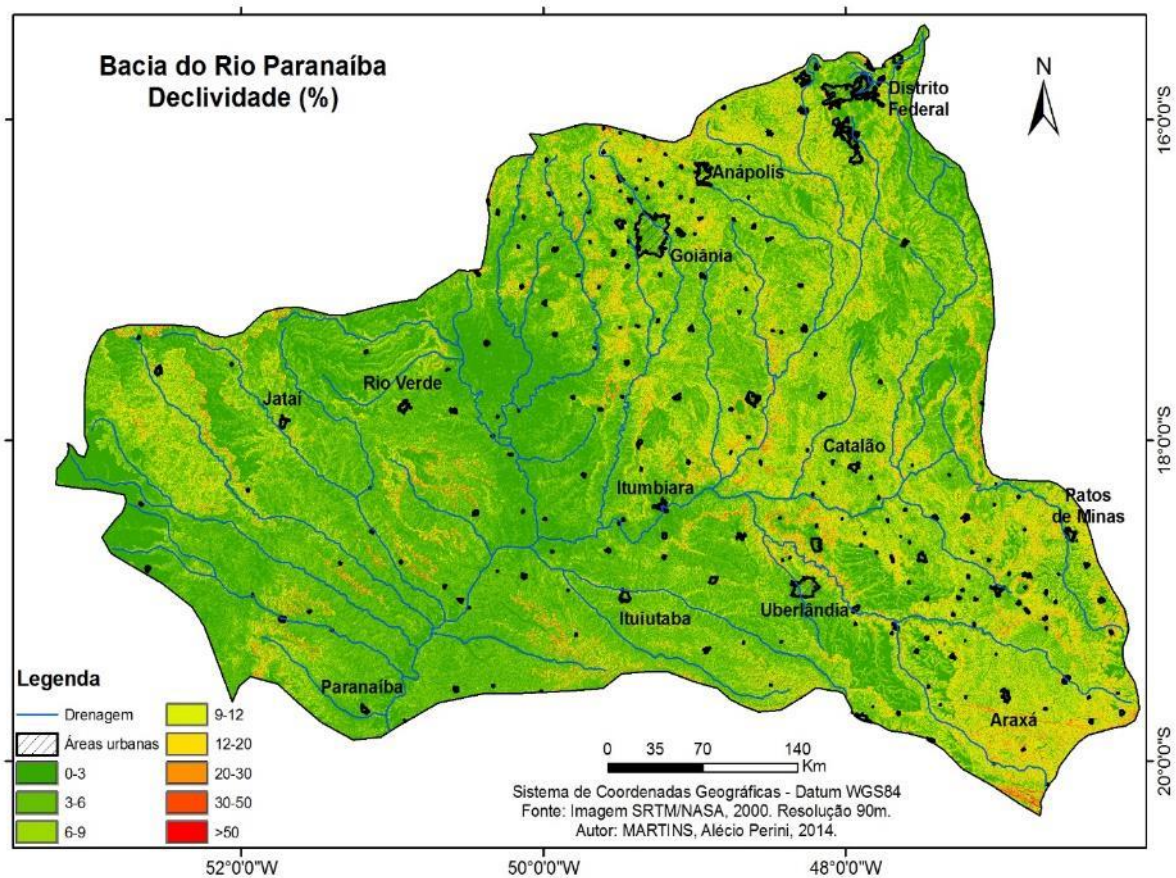
A porção leste, que coincide com áreas de formação cristalina da província Tocantins, altitudes mais elevadas, declividades mais acentuadas e, conseqüentemente, solos mais rasos e alcalinos, encontra-se recoberta por vegetação gramíneo-lenhosa, predominantemente campestre com ocorrência de vegetação savânica, principalmente campos limpos.



As áreas caracterizadas como “vegetação arbórea aberta” e “vegetação secundária e atividades agrícolas” (ANA, 2013) também se encontram associadas a atividades agropecuárias, restando uma área de 4% para áreas de parques, vegetação densa e espelhos d’água.

Os remanescentes de Mata Atlântica estão localizados nas proximidades do rio Paranaíba, principalmente nas UGHs Corumbá, São Marcos e Afluentes Mineiros do Alto Paranaíba. Já os remanescentes de Cerrado estão mais concentrados nas UGHs Claro, Verde, Corrente e Aporé, havendo áreas significativas também nas UGHs São Marcos e Rio Araguari (ANA, 2013, p.48)

**Mapa 7.** Mapa clinográfico da Bacia do Rio Paranaíba



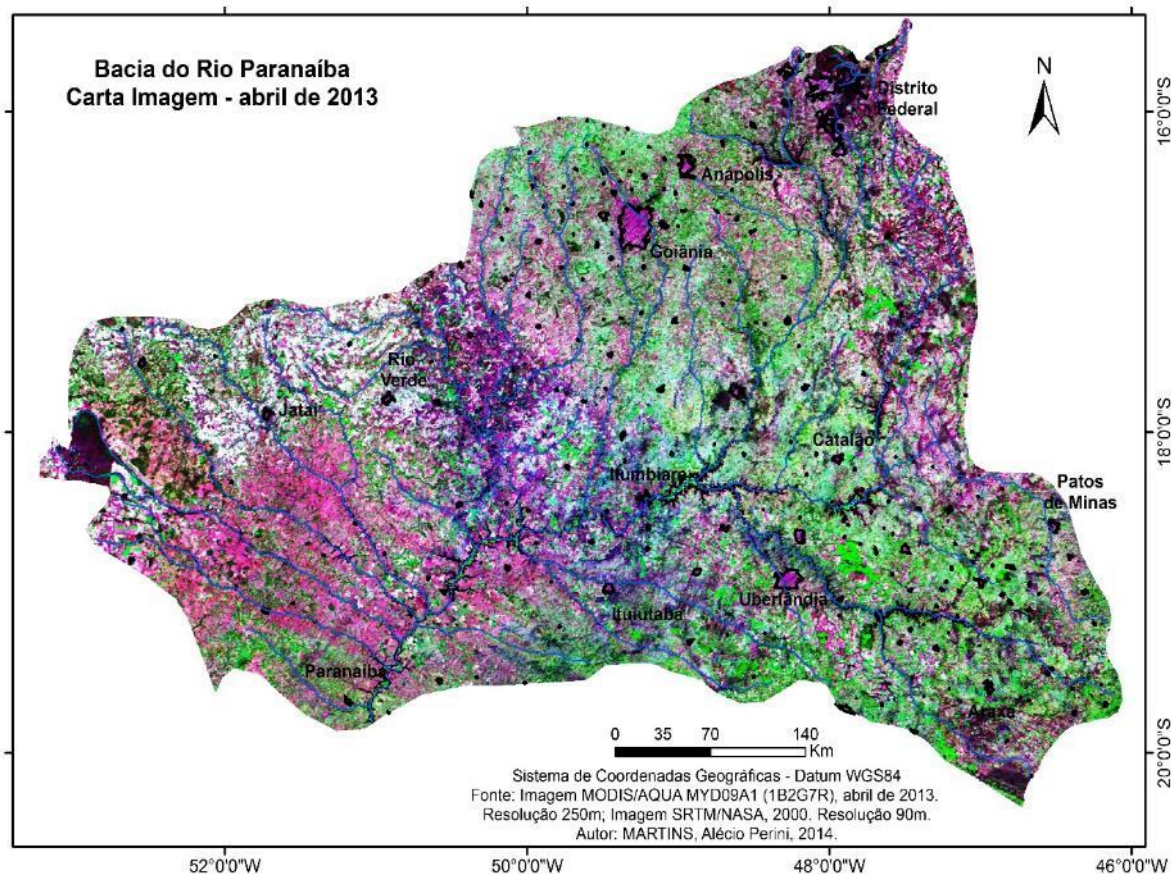
**Fonte:** EMBRAPA – Imagem SRTM/NASA, 2000.

**Autor:** MARTINS, Alécio Perini, 2014.

Tanto na carta-imagem da Bacia do Rio Paranaíba (mapa 8) quanto no mapa de uso da terra e cobertura vegetal do ano de 2013 (mapa 9), apesar da baixa resolução espacial da imagem MODIS/AQUA utilizada para classificação (250m), é possível observar que as áreas representadas pela cor verde escura (Cerrados e Florestas) recobre áreas que encontram-se associadas a parques, vegetação densa, vegetação gramíneo-lenhosa e algumas áreas savânicas, totalizando 27% da área total. Se considerarmos que existe um percentual de confusão entre

áreas de cerrado e pastagens devido à baixa resolução espacial da imagem, estima-se que uma faixa entre 25 e 29% da área da bacia do Rio Paranaíba seja recoberta por área de vegetação natural.

**Mapa 8.** Carta-imagem da Bacia do Rio Paranaíba do mês de abril de 2013.



**Fonte:** Imagem MODIS/AQUA, produto MYD09GA, 2013

**Autor:** MARTINS, Alécio Perini, 2014.

Além dos 27% identificados como áreas de vegetação natural e 1% de área recoberta por espelhos d'água, 72% da Bacia do Rio Paranaíba encontra-se antropizada, sendo 1,2% ocupado por aglomerações urbanas, 30,7% por áreas agrícolas e 40% por pastagens. Novamente, se considerarmos as dificuldades em mapear áreas de pastagens em imagens de baixa resolução, sugere-se que os 30,7% classificados como agricultura variem entre 28 e 32% e, as áreas de pastagem, podem chegar a cerca de 42%. Rosa e Sano (2014) produziram um mapa de uso da terra e cobertura vegetal com 81% de acerto de acordo com a estatística *Kappa* trabalhando com imagens de resolução de 30m, sendo a principal referência utilizada para comparação e validação dos resultados.

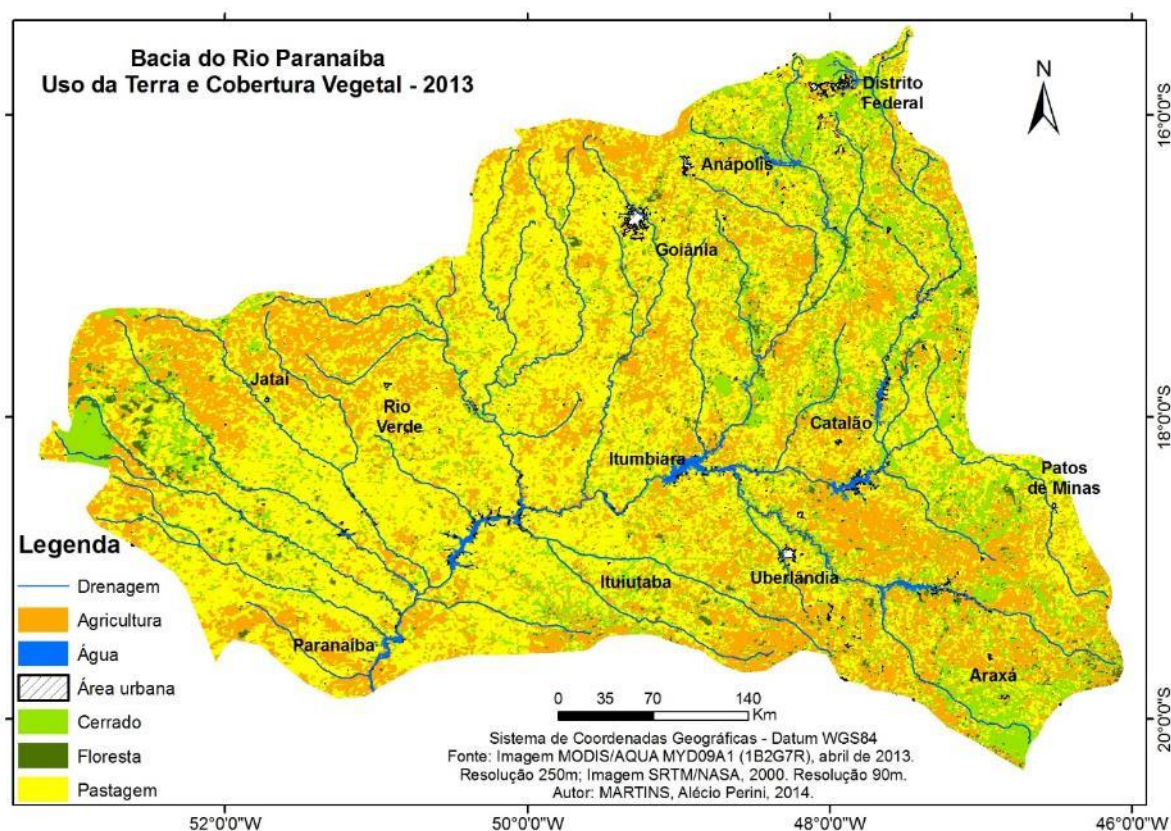
Cabe destacar que a ocupação humana, ao longo do processo de ocupação, se concentrou fortemente na parte leste da bacia, compreendida entre Brasília,



Goiânia e Uberlândia. Mais recentemente, a parte oeste da bacia vem apresentando um grande desenvolvimento do setor agropecuário e tem como polo a cidade de Rio Verde.

O mapeamento do atual uso e ocupação do solo na bacia do rio Paranaíba demonstra a predominância das atividades agropecuárias em cerca de 70% da área da bacia. A pecuária é predominante no setor oeste, enquanto a agricultura domina a porção centro-sudeste e diversas áreas de cabeceira de drenagem da bacia, inclusive com concentração de pivôs centrais de irrigação em alguns trechos, como nas bacias do alto rio São Marcos e do rio Araguari. Os recursos minerais concentram-se em algumas porções do território como em Acreúna, Anicuns e Catalão, em Goiás, e em Uberaba, Patrocínio e Araxá, na região do Triângulo Mineiro. (ANA, 2013, p.60)

**Mapa 9.** Uso da Terra e Cobertura Vegetal na Bacia do Rio Paranaíba – 2013.



**Fonte:** Imagem MODIS/AQUA, produto MYD09GA, 2013

**Autor:** MARTINS, Alécio Perini, 2014.

No mapeamento de uso da terra e cobertura vegetal do Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paranaíba (ANA, 2013), que não especifica o ano da imagem utilizada, nem a resolução espacial, expõe-se uma área de 26,8% recoberta por florestas e cerrados, percentual próximo à área que foi identificada na imagem MODIS/AQUA de 2013, mas sugere-se que essas áreas estejam superestimadas, justamente pela dificuldade em diferenciar áreas de pastagem de algumas feições de cerrado. O mesmo documento aponta uma área de aproximadamente 35% para agricultura e 35% para pastagem. O Plano aponta ainda 1% de área

de agricultura irrigada, considerada apenas como área de agricultura no mapeamento aqui realizado.

Embora as áreas com agricultura irrigada sejam extremamente importantes para o estudo de evapotranspiração, as imagens MODIS/AQUA não permitem a distinção dessa categoria pela baixa resolução espacial. Durante a análise da resposta apresentada por cada pixel, foram considerados pontos de controle em áreas irrigadas, identificadas com auxílio do Google Earth. As áreas mapeadas como núcleos urbanos e reservatórios de água são semelhantes nos dois estudos.

Rosa e Sano (2014), ao mapear as categorias de uso da terra e cobertura vegetal para a mesma área a partir de imagens TM/Landsat5, auxiliados por produtos de índice de vegetação do sensor MODIS/TERRA e, portanto, com maior detalhamento, identificaram uma área de 25,6% com diferentes práticas agrícolas para o ano de 2010. Se considerarmos a expansão na área plantada com cana-de-açúcar entre 2010 e 2013, bem como a probabilidade de erro na área mapeada como agricultura/silvicultura a partir da classificação do produto MYD09GA do MODIS/AQUA, verifica-se um crescimento nas áreas agrícolas da região. Segundo os autores, em 2010, a área apresentava cobertura vegetal natural de 29,4% e 41% de área destinada às pastagens. Considerando que a pastagem foi a atividade econômica que mais perdeu áreas para o cultivo de cana-de-açúcar, avalia-se que não existem grandes diferenças entre os mapeamentos apresentados pelos três estudos comparados. Na tabela 01 é possível comparar os percentuais obtidos para cada classe de uso da terra e cobertura vegetal nos mapeamentos realizados neste estudo, por Rosa e Sano (2014) e pelo Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paranaíba (ANA, 2013).

O Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paranaíba aponta, ainda, que as regiões que apresentam maiores percentuais de áreas de vegetação natural conservada são o Distrito Federal e as bacias dos Rios São Marcos e Corumbá, localizados na porção leste da bacia, em áreas de relevo mais dissecado, afloramentos de rochas e solos mais rasos e de baixa fertilidade. As áreas mais críticas correspondem justamente às regiões densamente ocupadas por agricultura e pecuária, com destaque para a bacia do Rio dos Bois, Meia Ponte e afluentes mineiros do alto e baixo Paranaíba.

**Tabela 01.** Porcentagem de área ocupada por cada categoria de uso da terra e cobertura vegetal na bacia do Rio Paranaíba, comparando os estudos de Martins (2015), ANA (2013) e Rosa e Sano (2014)

CATEGORIA DE USO DA TERRA E COBERTURA VEGETAL	MARTINS (2014)*	PRH PARANAÍBA (SEM DATA)**	ROSA E SANO (2010)***
AGRICULTURA	30,7	35,0	25,6
AGRICULTURA IRRIGADA		1,0	1,0
ÁGUA	1,1	1,0	1,1
ÁREA URBANA	1,2	1,2	1,2
PASTAGEM	40,0	35,0	41,1
SILVICULTURA			0,6
VEGETAÇÃO NATURAL	27,0	26,8	29,4
TOTAL	100	100,0	100,0

**Fonte:** \*Imagem MODIS/AQUA (7R2G1B) de abril de 2014; \*\*ANA, 2013 (o documento não informa a data das imagens utilizadas para classificação); \*\*\*Rosa e Sano, 2014 (imagens TM/Landsat, mosaico do ano de 2010).

Como pôde-se observar nos mapas e nos números apresentados, a Bacia do Rio Paranaíba apresenta plenas condições para o desenvolvimento de agricultura e pecuária em bases empresariais, além de um grande potencial energético que, apesar de muito explorado, ainda apresenta grande potencial para a construção de pequenas centrais hidrelétricas (PCH's).

Considerando a intensa ocupação nos últimos três séculos com a introdução da atividade pecuária e, a partir da segunda metade do século XX com o desenvolvimento de atividades agrícolas, além da rápida e intensa redução nas áreas de vegetação natural, nota-se que a proposição de planos de ordenação territorial e desenvolvimento sustentável para a região é uma necessidade urgente.

É preciso encontrar formas de aproveitar todo esse potencial produtivo mas, ao mesmo tempo, garantir que as áreas de preservação permanente e reserva legal, além das áreas com relevo mais movimentado sejam recompostas e conservadas. É preciso, também, estabelecer áreas públicas de conservação e preservação ambiental, garantindo a conectividade entre esses ambientes por meio de corredores ecológicos e permitindo a recomposição e conservação da fauna local. Práticas de produção conservacionistas, insumos com menor potencial poluente e recomposição vegetal podem garantir, a médio/longo prazo o reestabelecimento da vazão da maioria dos cursos d'água que compõem a bacia, reduzir o assoreamento dos reservatórios, melhorar a qualidade de vida da população e, conseqüentemente, alterar padrões locais e regionais de comportamento de elementos do clima como evapotranspiração, precipitação e temperaturas médias, máximas e mínimas.

#### **4. ANÁLISE DA VARIAÇÃO ESPACIAL E SAZONAL DOS ELEMENTOS DO CLIMA NA BACIA DO RIO PARANAÍBA (1970/2012)**

Por ser um sistema natural, com limites naturalmente constituídos, a bacia hidrográfica se mostra como uma unidade interessante de análise e planejamento por concentrar todas as fases do ciclo hidrológico, seja em sua fase atmosférica (precipitação, umidade), responsável pela entrada de água no sistema, seja em sua fase superficial e subsuperficial (escoamento, infiltração, evapotranspiração etc.). Ainda, concentra relações de causa e efeito entre atividades humanas e fatores ambientais que vão além dos limites territoriais.

No que concerne aos aspectos climatológicos, o elemento que mais importa, no caso específico deste estudo, é a evapotranspiração, bem como as variáveis que a determinam, como albedo, índice de vegetação, temperatura de superfície, fluxo de calor no solo e fluxo de calor sensível, entre outros. Nessa seção, serão trabalhadas de forma mais ampla as características climatológicas da Bacia do Rio Paranaíba a partir das redes de estações convencionais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), utilizando elementos como precipitação, temperatura média, máxima e mínima, umidade relativa do ar, velocidade dos ventos e o balanço hídrico do solo de acordo com metodologia de Thornthwaite e Mather (1955).

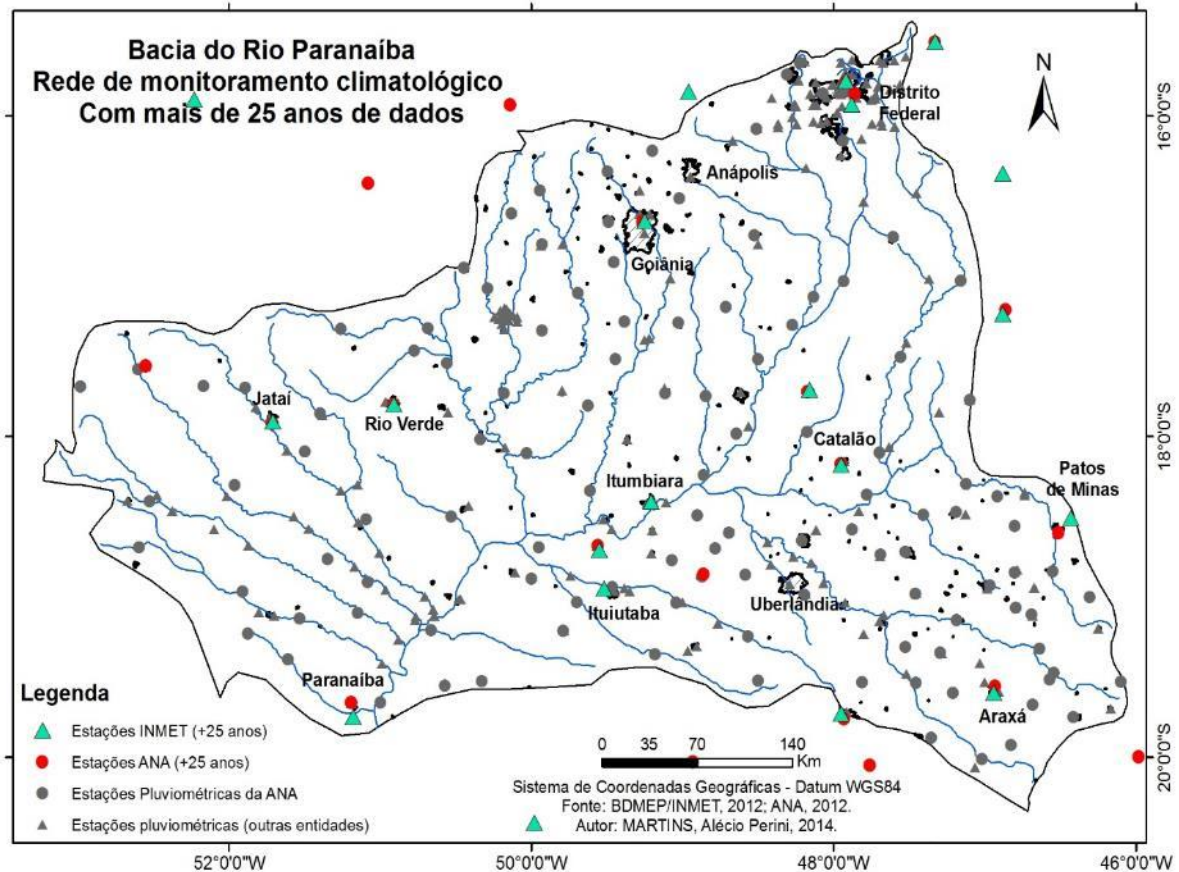
Mariano (2005, p.23) argumenta que

Para a realização do zoneamento climático há necessidade do conhecimento dos elementos climáticos de uma região, como os registros dos elementos meteorológicos, que, de acordo com a Organização Mundial de Meteorologia (OMM) devem constar de uma série de 30 anos, para aferir uma tipologia climática e observar a variabilidade desses elementos no tempo e no espaço geográfico.

Apesar da grande rede de monitoramento de superfície evidenciada no mapa 10, não existem dados climatológicos de 30 anos disponíveis para toda a área de estudo, sendo que foram selecionadas apenas as estações que cumpriam esse requisito para a espacialização, visto que período de dados inferiores podem mascarar ou tendenciar os resultados. Houve uma tentativa em realizar a espacialização com dados das estações automáticas do INMET, mas como a maioria não apresentava mais do que 10 anos de dados, os resultados não podem ser utilizados para caracterizar o clima regional, apenas para mostrar uma tendência de variação na última década. As estações climatológicas utilizadas nesta caracterização, bem como seu intervalo de dados e localização encontram-se no mapa 11 e no quadro 3.

Nesta seção, o objetivo central é utilizar essas séries históricas de dados, espacializados por interpolação, para posteriormente compará-los às informações obtidas em superfície por sensoriamento remoto, em especial, a evapotranspiração real calculada por balanço hídrico.

**Mapa 10.** Rede de monitoramento climatológico e pluviométrico de superfície da Agência Nacional de Águas (ANA) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), entre outros órgãos – 2012.



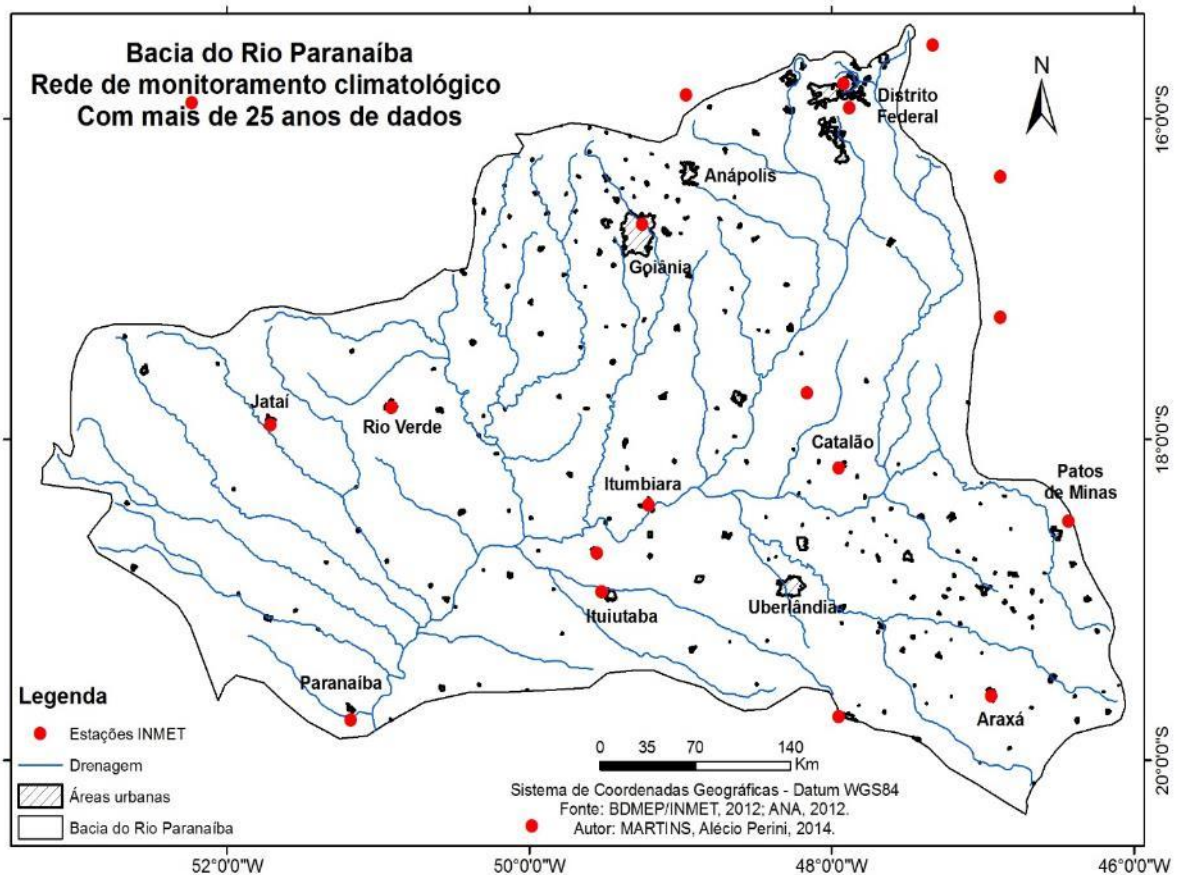
**Fonte:** ANA, 2012; INMET, 2012

**Organização:** MARTINS, Alécio Perini, 2014.

Na área da bacia do Rio Paranaíba, assim como acontece em grande parte do Brasil Central, existe uma deficiência na cobertura e distribuição espacial dessas estações, o que não permite um estudo mais detalhado sobre o comportamento das variáveis climáticas no tempo e no espaço, bem como análises de ritmo e comparações com outras informações obtidas em superfície. Nesse sentido, as imagens de sensoriamento remoto e as ferramentas de geoprocessamento têm se mostrado imprescindíveis, pois permitem o mapeamento de variáveis como precipitação, temperatura de superfície e evapotranspiração real pixel a pixel, cobrindo grandes áreas de difícil acesso ou com escassez de estações de monitoramento.



**Mapa 11.** Rede de monitoramento climatológico de superfície do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), com mais de 25 anos de dados.



**Fonte:** ANA, 2012; INMET, 2012

**Organização:** MARTINS, Alécio Perini, 2014.

Existem dois métodos de interpolação mais utilizados para espacialização de dados climatológicos: o inverso do quadrado da distância (IDW) e a Krigagem. Yamamoto e Landim (2013), destacam que o sistema de krigagem baseia-se na ideia de que quanto maior a covariância entre uma amostra e o local que está sendo estimado, mais essa amostra deve contribuir com a estimativa. Dessa forma, considera-se que é um método mais significativo para áreas com maior cobertura de pontos de monitoramento, apresentando estimativas mais confiáveis. Já o IDW é um método puramente geométrico, onde o peso entre as amostras diminui à medida em que essas amostras se distanciam. Enquanto essas distâncias são euclidianas no IDW, na krigagem são baseadas na análise variográfica, que consideram o relacionamento entre os pontos conhecidos e os pontos estimados, fornecendo informações mais detalhadas sobre o agrupamento (YAMAMOTO e LANDIM, 2013). Embora considere apenas as distâncias euclidianas, o IDW tem sido bastante utilizado em interpolações que apresentam poucos pontos de controle, com resultados satisfatórios.



A krigagem pode ser usada, como algoritmo estimador, para:

- a) A previsão do valor pontual de uma variável regionalizada em um determinado local dentro do campo geométrico; é um processo de interpolação exato que leva em consideração os valores observados na vizinhança próxima, o qual pode ser a base para a cartografia automática por computador quando se dispõe de valores de uma variável regionalizada distribuídos em uma determinada área;
- b) O cálculo do valor médio de uma variável regionalizada para um volume maior que o suporte geométrico, como, por exemplo, no cálculo do teor médio de um bloco de cubagem de uma jazida com base em informações obtidas de testemunhos de sondagem. (YAMAMOTO e LANDIM, 2013, p.63)

**Quadro 3.** Informações sobre as estações convencionais do INMET utilizadas para caracterização climática da bacia do Rio Paranaíba.

ESTAÇÃO	UF	INÍCIO	FIM	ANOS	LAT	LONG	ALT
ARAGARÇAS	GO	01/05/1970	03/08/2012	42	-15,90	-52,23	345,0
ARAXÁ	MG	01/04/1963	12/02/2009	46	-19,60	-46,94	1023,6
BAMBUÍ	MG	01/01/1961	03/08/2012	51	-20,03	-45,00	661,3
BRASÍLIA	DF	21/08/1961	03/08/2012	51	-15,78	-47,92	1159,5
CAPINÓPOLIS	MG	01/01/1961	03/08/2012	51	-18,71	-49,55	620,6
CATALÃO	GO	01/01/1961	03/08/2012	51	-18,18	-47,95	840,5
FORMOSA	GO	01/01/1961	03/08/2012	51	-15,54	-47,33	935,2
FRANCA	SP	01/01/1961	03/08/2012	51	-20,58	-47,36	1026,2
GOIÂNIA	GO	01/01/1961	03/08/2012	51	-16,66	-49,25	741,5
IPAMERI	GO	11/02/1977	03/08/2012	35	-17,71	-48,16	773,0
ITUIUTABA	MG	01/01/1961	20/05/2008	51	-18,95	-49,52	560,0
IVINHEMA	MS	01/09/1966	03/08/2012	46	-22,30	-53,81	369,2
JATAÍ	GO	24/11/1978	03/08/2012	34	-17,91	-51,71	602,9
PARACATU	MG	03/07/1973	03/08/2012	39	-17,24	-46,88	712,0
PARANAIBA	MS	08/07/1971	03/08/2012	41	-19,75	-51,18	331,3
PATOS DE MINAS	MG	01/01/1961	03/08/2012	51	-18,51	-46,43	940,0
PIRENÓPOLIS	GO	17/02/1977	03/08/2012	35	-15,85	-48,96	740,0
POSSE	GO	01/11/1975	03/08/2012	37	-14,10	-46,36	825,6
RIO VERDE	GO	01/11/1971	03/08/2012	41	-17,80	-50,91	774,6
RONCADOR	DF	01/04/1994	30/06/2012	18	-15,93	-47,88	1100,6
UBERABA	MG	01/01/1961	03/08/2012	51	-19,73	-47,95	737,0
UNAÍ	MG	01/05/1978	03/08/2012	34	-16,36	-46,88	460,0

Fonte: BDMEP/INMET, 2012.

Mesmo com a pequena quantidade de estações e a cobertura irregular da área, após testes com os dois métodos optou-se pela krigagem, que apresentou isolinhas mais coerentes com os dados disponíveis. O ArcGIS 10.1® apresenta função automática para krigagem na extensão 3D Analyst, onde foi definido raio variável para os valores, com 10 isolinhas entre cada estação, visto que a variabilidade entre os valores máximos e mínimos não era tão significativa.

Posteriormente, os dados foram agrupados em classes com a ferramenta “Reclassify” do Spatial Analyst Tools, considerando a amplitude dos dados para determinar 4 classes de intervalos iguais para cada variável. Foram escolhidas cores frias para representação dos dados de precipitação, umidade relativa do ar, velocidade dos ventos e excedente hídrico e cores quentes para representação de informações de temperatura, evapotranspiração e deficiência hídrica.

Por interpolação (krigagem) foi possível analisar a variação climática no período estudado, bem como a tendência climática, de acordo com os estudos de Christofolletti (1992). Assim, é possível identificar anos com variações acima, abaixo ou na média, bem como calibrar o modelo utilizado para estimativa de evapotranspiração e, a partir destes dados, estabelecer comparações entre os dados obtidos em estações climatológicas e em superfície por sensoriamento remoto.

A partir de informações de precipitação total mensal e temperatura média mensal, é possível calcular o balanço hídrico do solo, visto por Moragas (2005, p.60) como

uma das representações mais interessantes para o estudo da bacia hidrográfica, pois se baseia em entradas e saídas de matéria e energia numa dada área. Sendo uma bacia ele permite compreender mais facilmente este sistema de entrada (precipitação), armazenamento (solo e litologia) e saída (vazão ou evapotranspiração).

O balanço hídrico permite ainda conhecer a capacidade que cada área dentro da bacia hidrográfica possui de armazenar água e, aliados às categorias de uso da terra e estágios de conservação, de produzir água, regularizando as vazões dos cursos d'água e ajudando a prevenir inundações ou secas severas.

Para Attanasio (2004, p.17), estudos em bacias hidrográficas fornecem metodologias que contribuem com a implementação de um novo paradigma de manejo agrícola, definido por ele como “manejo ecossistêmico”. Black (1996) apud Attanasio (2004, p.17) define três objetivos gerais em manejo de bacias hidrográficas: 1) restauração de áreas alteradas, degradadas ou abandonadas; 2) proteção de áreas sensíveis; 3) melhoramento das características dos recursos hídricos por meio de manejo correto.

Assim, destaca-se a importância da vegetação no balanço de energia e no fluxo de volumes de água na bacia hidrográfica, visto que ela intercepta a parcela inicial da precipitação e aumenta a capacidade de infiltração de água no solo, reduzindo o escoamento superficial e o transporte de sedimentos, além de colaborar com a recarga dos lençóis subterrâneos, que irão abastecer os cursos d'água no período de estiagem. Além disso, a presença de vegetação aumenta o tempo de concentração da água no interior da bacia, tido como “o tempo que uma

gota de água leva para escoar superficialmente o ponto mais distante da bacia até a seção principal. É indicador da memória de resposta da bacia” (TUCCI e MENDES, 2006 p.21).

A manutenção da vegetação em áreas de Preservação Permanente e nas Reservas Legais (previstas em lei), aliadas a técnicas sustentáveis de manejo do solo e ocupação das terras, garantem a estabilidade da bacia hidrográfica.

As condições precárias que, muitas vezes, se observam nos rios e que são indicativos de que sua “saúde” não vai bem, são o resultado final de problemas que já vem ocorrendo há algum tempo ao longo de uma bacia, em variados níveis do processo produtivo. Intervenções em pontos isolados desta cadeia de causa-efeito (dragagens, barramentos, canalizações) falham na maioria das vezes por não considerarem a bacia como um sistema e, desta forma, não atacarem a origem do problema (TUCCI e MENDES, 2006 p.171).

Conforme o Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paranaíba (ANA, 2013), segundo a classificação climática de Köppen, o clima se caracteriza como Aw, tropical quente em todas as estações do ano, com temperatura média mensal superior a 18°C com inverno seco. Sabemos que essa classificação apresenta problemas, pois várias partes da bacia apresentam meses com temperaturas médias inferiores a 18°C, principalmente de junho a agosto. Por se tratar de uma área bastante heterogênea, é a classificação que mais se aproxima da realidade local.

Segundo Mendes (2001), com base nos estudos de Nimer (1979), o clima no estado de Minas Gerais, com características semelhantes em toda a área da bacia do Rio Paranaíba, sofre influência de fenômenos meteorológicos de latitudes médias tropicais, conferindo-lhe uma característica de clima de transição, com apenas duas estações bem definidas: verão e inverno. A gênese destas características está na dinâmica de atuação de sistemas atmosféricos como a Frente Polar Atlântica (FPA) que “praticamente todos os anos, juntamente com a MP [massa polar], alcança o Estado de Minas Gerais, causando diminuição de temperatura do ar durante o verão”. (MENDES, 2001 p.82). Já no inverno, graças às diferenças térmicas entre o ar da região do Equador e do Pólo Sul,

as frentes apresentam forte gradiente barométrico, que provoca regiões de movimento ascendente do ar, normalmente na frente norte do sistema frontal, que ocasiona precipitação tipicamente frontal, abrangendo principalmente a faixa sul dos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo e toda a região Sul. (MENDES, 2001 p.82)

No verão, a diferenciação térmica entre a zona equatorial e áreas de altas latitudes não é tão alta quanto no inverno, mesmo assim, segundo Mendes (2001), as frentes continuam operando, com atividade convectiva associada relativamente baixa, o que levaria a crer que a

precipitação na região diminuiria, o que na realidade não acontece. O autor explica que o “aquecimento continental nesse período do ano produz células de baixa pressão, favorecendo a formação de chuvas”. (MENDES, 2001 p.83)

Com base nos estudos de Nimer (1979) que, apesar dos mais de 30 anos de publicação continua a ser uma das melhores referências no assunto, destaca-se que a posição da Bacia do Rio Paranaíba na metade do caminho entre as áreas equatoriais e temperadas, faz com que a região seja atingida por perturbações do sul (associadas às Massas Polares), de leste (ondas que se deslocam na região equatorial no sentido oeste-leste) e de oeste (relacionadas com centros de baixa pressão, que recebem o nome de Linhas de Instabilidade Tropical).

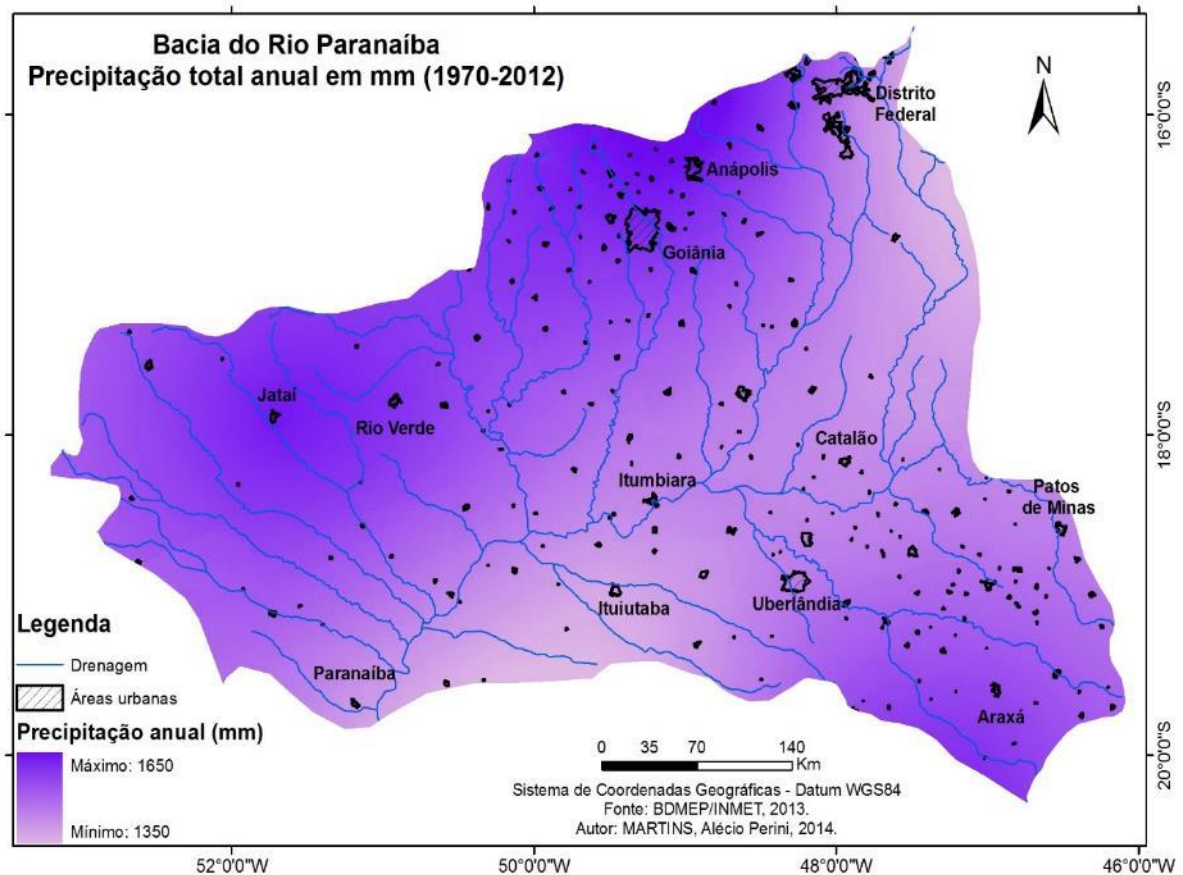
Ainda segundo Nimer (1979), estas perturbações de oeste, que ocorrem com maior frequência na primavera e no verão, associam-se à alta umidade amazônica (Massa Equatorial Continental) provocando chuvas na região. Quando associadas às frentes frias que, mesmo no verão, continuam atuando, forma-se um “corredor” entre a região amazônica e o litoral do sudeste conhecido como Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), responsável por precipitações contínuas e intensas na região, por períodos que se estendem de 3 a 7 dias.

A partir da análise do mapa 12 e da tabela 2, nota-se que os maiores valores pluviométricos anuais concentram-se na porção norte/noroeste da bacia, justamente na faixa de deslocamento da massa equatorial continental que traz umidade da Amazônia na primavera e no verão e no extremo sudeste da bacia, próxima à região da Serra da Canastra, com totais anuais médios superiores a 1600mm.

Os menores volumes concentram-se próximo ao médio/baixo curso do Rio Paranaíba, diminuindo em direção à confluência com o Rio Grande, variando de 1340mm a 1425mm anuais. Observa-se outra faixa com volumes pluviométricos reduzidos no extremo leste da bacia, sob influência dos sistemas atmosféricos da bacia do Rio São Francisco e da região semiárida de Minas Gerais.

Apesar de um bom volume médio anual, o principal problema das precipitações na Bacia do Rio Paranaíba encontram-se em sua concentração na primavera/verão, sendo que os meses de outubro a março concentram aproximadamente 85% das chuvas, especialmente os meses de dezembro e janeiro, que chegam a concentrar 50% das precipitações em alguns anos. Dessa forma, o termo estação chuvosa é mais adequado que o termo verão para a região.

**Mapa 12.** Precipitação total anual média (em mm) na bacia do Rio Paranaíba, considerando série histórica de 42 anos.



Fonte: BDMEP/INMET, 2012

Organização: MARTINS, Alécio Perini, 2014.

Com relação às temperaturas médias (mapa 13), a variação espacial obedece principalmente a altitude, sendo as menores médias registradas na porção sudeste da bacia, em áreas com altitudes superiores a 1000m e sob influência dos sistemas atmosféricos que definem o clima do sul de Minas Gerais e da Serra da Canastra. A maior parte da área apresenta médias anuais entre 23,6°C e 24,7°C.

As temperaturas extremas (médias), conforme exposto na tabela 2, também apresentam variação espacial condicionada pelas altitudes do terreno, além de influências das massas de ar equatorial continental e tropical continental, essencialmente quentes, e fatores locais, como localização das estações.

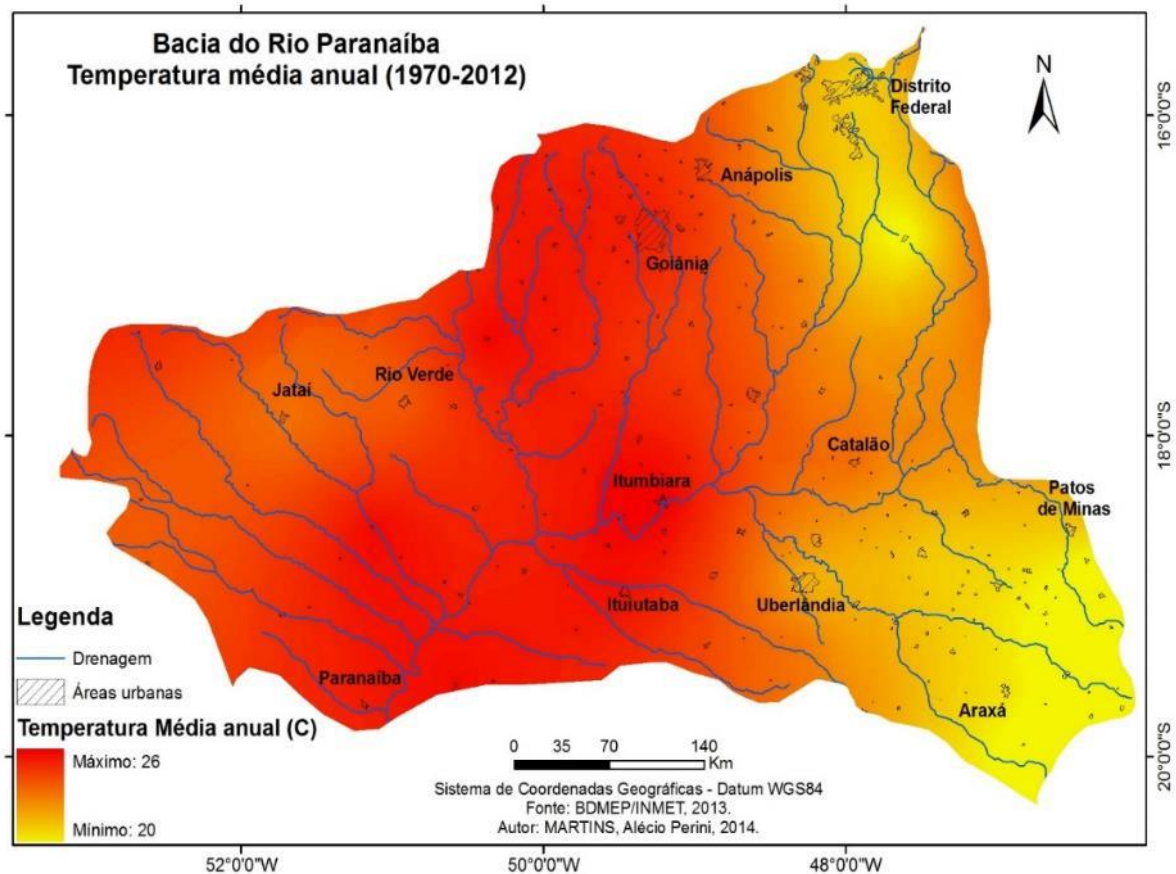
**Tabela 2.** Valores médios obtidos a partir da série histórica de dados para as estações climatológicas convencionais do INMET na Bacia do Rio Paranaíba e entorno 1970/2012.

NOME	UF	ALT	PREC (MM)	TEMP MÉD (°C)	TEMP MÁX (°C)	TEMP MÍN (°C)	U.R. (%)	VENTO M/S
ARAGARÇAS	GO	345,0	1475,8	26,8	30,9	19,8	68,5	
ARAXÁ	MG	1023,6	1545,3	22,1	26,5	16,4	72,9	
BAMBUÍ	MG	661,3	1470,7	21,1	26,7	14,4	73,0	
BRASÍLIA	DF	1159,5	1540,3	22,3	26,9	17,2	65,0	2,7
CATALÃO	GO	840,5	1438,3	24,0	27,3	17,6	64,8	1,6
FORMOSA	GO	935,2	1350,0	23,6	25,9	15,8	65,0	
FRANCA	SP	1026,2	1645,1	22,0	24,9	16,4	67,9	2,4
GOIÂNIA	GO	741,5	1602,0	25,3	30,5	17,9	62,3	1,0
IPAMERI	GO	773,0	1443,4	23,8	24,8	16,2	68,4	
ITUIUTABA	MG	560,0	1391,1	25,5	28,0	18,5	67,2	
IVINHEMA	MS	369,2	1458,5	23,3	28,9	16,8	76,6	2,5
JATAÍ	GO	602,9	1629,5	23,9	29,7	16,8	68,6	
PARACATU	MG	712,0	1403,0	24,3	23,6	14,1	70,4	2,1
PARANAIBA	MS	331,3	1412,9	25,3	27,8	17,0	67,9	1,0
PATOS DE MINAS	MG	940,0	1450,1	22,7	27,9	16,3	67,2	1,8
PIRENÓPOLIS	GO	740,0	1686,8	24,5	28,8	17,6	66,6	1,5
POSSE	GO	825,6	1421,7	25,1	27,0	19,5	62,4	1,5
RIO VERDE	GO	774,6	1587,8	24,3	28,1	17,4	66,2	
RONCADOR	DF	1100,6	1413,4	22,4	27,7	14,8	66,9	2,2
UBERABA	MG	737,0	1544,8	23,5	28,8	16,4	68,2	2,3
UNAÍ	MG	460,0	1333,4	25,7	30,5	17,9	65,3	1,1

**Fonte:** BDMEP/INMET, 2012.

As maiores médias de temperaturas máximas foram registradas nas estações de Goiânia, Jataí e Aragarças, acima de 29°C, mas com extremos acima de 40°C no período de verão. As temperaturas máximas médias abaixo de 26°C concentram-se nas regiões de Araxá e afluentes do alto curso do Rio Paranaíba. Já a distribuição das temperaturas mínimas médias é mais uniforme, com pontos de valores mais elevados nas regiões de Goiânia, Rio Verde, Catalão e Ituiutaba, com médias acima de 17°C. Médias mais baixas foram observadas nas estações de Araxá e Roncador, com grande interferência da altitude e da vegetação de entorno, embora as variações não sejam tão significativas.

**Mapa 13.** Temperatura média anual (em °C) na bacia do Rio Paranaíba, considerando série histórica de 42 anos.



**Fonte:** BDMEP/INMET, 2012

**Organização:** MARTINS, Alécio Perini, 2014.

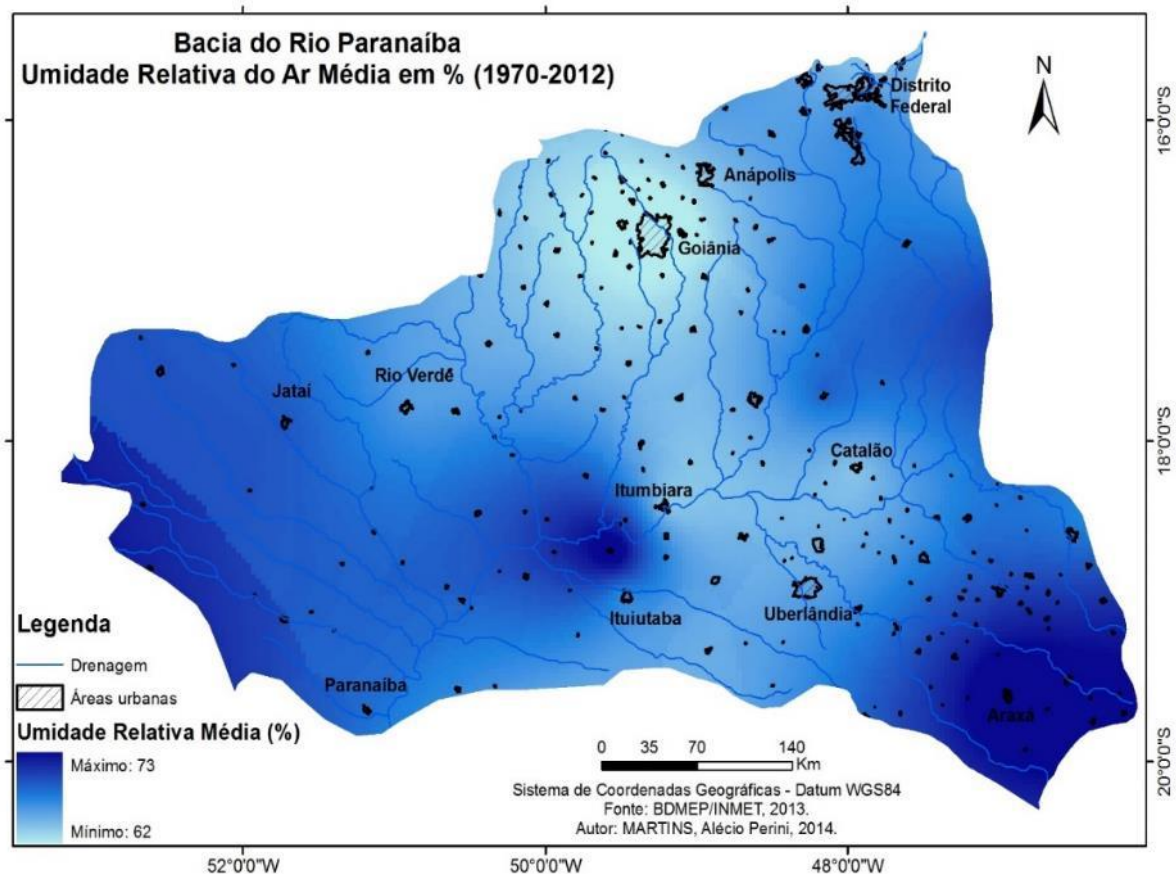
Com relação à Umidade Relativa do Ar, os maiores índices são registrados entre os meses de novembro e março, com médias anuais próximas a 65%. Entre os meses de abril e outubro, os valores apresentam-se mais baixos, apresentando extremos entre julho e setembro, quando são registrados índices próximos a 10% em algumas áreas da bacia. Conforme o mapa 14, não existe uma tendência de comportamento espacial dessa variável, que está relacionada mais a fatores locais. As áreas com índices mais elevados coincidem com áreas com maior percentual de vegetação natural conservada, como no sudeste e oeste da bacia, com médias superiores a 70%. O mapeamento evidencia um círculo de baixa umidade sobre a bacia do Rio Meia ponte e sobre a região metropolitana de Goiânia, ocasionado provavelmente pelo fato de a estação estar localizada na área central da cidade, com intensa influência das áreas pavimentadas.

Com relação aos dados de velocidade dos ventos, fundamentais para o cálculo de estimativa do fluxo de calor sensível e da evapotranspiração instantânea e diária, nem todas as



estações utilizadas no estudo apresentavam dados consistentes que permitissem uma análise mais aprofundada dessa variável que, conforme o mapa 15 e a tabela 2, apresenta valor médio de 1,8 m/s (6,5 Km/h), embora essa média mascare rajadas de até 50Km/h entre os meses de julho e agosto e em eventos pluviométricos extremos. Como não é possível trabalhar com preenchimento de falhas nesse caso, por se tratar de uma informação com ocorrências pontuais e grande variação, foram utilizadas apenas as estações que dispunham destas informações. As maiores médias concentram-se na porção leste/nordeste e sudeste da bacia, em áreas com elevações acima de 900m com reduções graduais em direção à foz do Rio Paranaíba.

**Mapa 14.** Umidade Relativa do Ar média (em %) na bacia do Rio Paranaíba, considerando série histórica de 42 anos.



**Fonte:** BDMEP/INMET, 2012  
**Organização:** MARTINS, Alécio Perini, 2014.

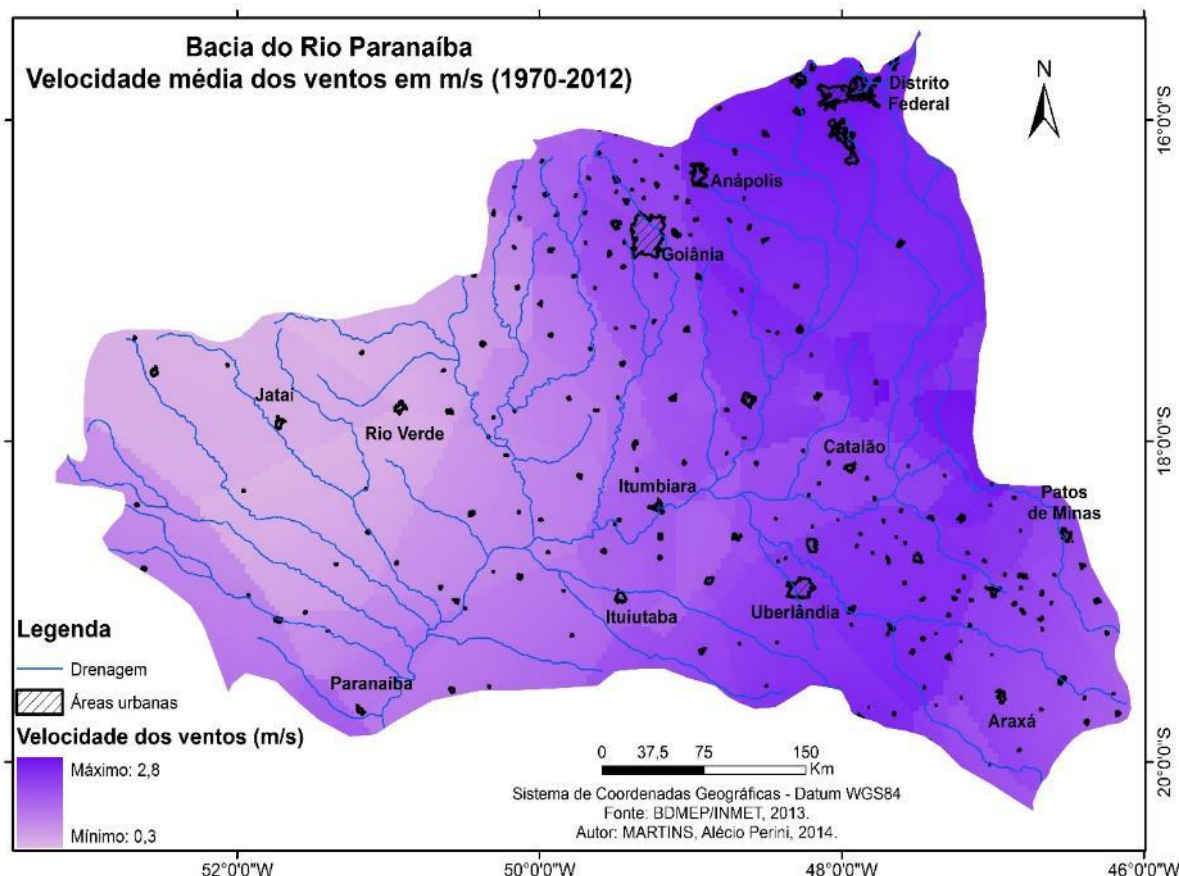
A baixa densidade de estações, bem como as falhas na coleta de dados não permitem que uma análise mais complexa seja realizada, mas permitem um conhecimento mais amplo do comportamento espacial e sazonal dos elementos do clima na área de estudo.

Conforme pode ser observado nos dados climatológicos, os extremos são muito mais significativos que as médias, visto que a bacia do Rio Paranaíba apresenta uma característica



bastante clara, com duas estações bem definidas: o período chamado regionalmente de verão (estação chuvosa), de meados de outubro até o mês de março, se estendendo até abril em alguns anos; e o período conhecido como inverno (estação seca), de meados de abril até o início de outubro.

**Mapa 15.** Velocidade do vento média (em m/s) na bacia do Rio Paranaíba, considerando série histórica de 42 anos.



**Fonte:** BDMEP/INMET, 2012

**Organização:** MARTINS, Alécio Perini, 2014.

Na estação chuvosa, que concentra entre 85% e 90% das precipitações anuais, as chuvas apresentam maior concentração nos meses de dezembro e janeiro, período em que são produzidos grãos na região, visto que fora desse período é preciso utilizar irrigação para cultivo de grãos e outras variedades. Nesse período, as médias de umidade relativa são superiores a 70%, o que ameniza a sensação térmica provocada pelas temperaturas máximas médias acima de 28°C, com picos acima de 40°C de janeiro a março, auge do verão no hemisfério sul. Apesar da abundância em chuvas, as altas temperaturas elevam os valores de evapotranspiração, intensificando o ciclo hidrológico nesse período, que também apresenta os maiores índices de água excedente no solo.

A estação seca é caracterizada pelas temperaturas médias mais amenas, mas raramente abaixo de 16°C e com extremos inferiores a 8°C em dias isolados entre os meses de maio e julho. Mas a principal característica do inverno na bacia do Rio Paranaíba não se encontra nas temperaturas médias e mínimas, mas na redução brusca na quantidade e distribuição de chuvas, que não passa de 15% do total anual entre os meses de maio e setembro e pela redução da umidade relativa do ar, com médias inferiores a 55%, chegando a índices inferiores a 30% e extremos inferiores a 15% entre os meses de junho e setembro. O maior desconforto térmico é sentido nos meses de agosto e setembro, final do período seco, quando geralmente não chove na região, as temperaturas máximas ultrapassam 36°C e índices de umidade relativa abaixo de 30%, com aumento considerável no número de queimadas e agravamento dos índices de poluição do ar.

Ao final do período seco, observa-se um alto índice de deficiência de água no solo, que começa a ser reposta no mês de novembro, dependendo do início do período chuvoso, deixando agricultores em alerta pelos riscos de perdas na produtividade por falta de água no solo.

A compreensão da dinâmica dos elementos climáticos no período de inverno é fundamental para compreender as relações de entrada e retirada de água do solo e nos padrões de evapotranspiração, fundamentais para uma região como a bacia do Rio Paranaíba, com economia fortemente voltada para atividades agropecuárias.

A partir dos dados de temperatura média mensal e precipitação mensal total e com auxílio de software desenvolvido por Rolim e Sentelhas (2003) que considera, também, variáveis como latitude da estação, número de dias do mês e horas de insolação em condições de céu claro, foi possível calcular o balanço hídrico para cada ano da série histórica 1970/2012 e, posteriormente, elaborar a tabela 03, com os valores médios de evapotranspiração potencial, evapotranspiração real, déficit e excedente hídrico.

Esse método, desenvolvido por Thornthwaite e Mather (1955), permite uma melhor compreensão das relações de entrada e saída de água no sistema solo/atmosfera, utilizando somente os conceitos de evapotranspiração potencial ou de referência e evapotranspiração real. Como capacidade de armazenamento do solo, foram considerados valores de 150mm para estações localizadas em áreas de Latossolos e 100mm para áreas de Argissolos, Cambissolos e Neossolos.

A evapotranspiração potencial (ETp) corresponde à evapotranspiração de uma extensa superfície coberta por vegetação rasteira, em crescimento ativo e cobrindo totalmente o solo,

sem restrição hídrica, considerada como condição ideal para evaporação. A evapotranspiração potencial depende apenas de fatores meteorológicos, como temperatura e precipitação. Já a evapotranspiração real (ET<sub>r</sub>), apesar de calculada nas mesmas condições, considera situações de restrição hídrica.

**Tabela 3.** Valores médios obtidos a partir do balanço hídrico do solo da série histórica de dados para as estações climatológicas convencionais do INMET na Bacia do Rio Paranaíba e entorno 1970/2012.

NOME	UF	ALTITUDE	PREC (MM)	TEMP MÉDIA (°C)	ETP (MM)	ETR (MM)	DÉF (MM)	EXC (MM)
ARAGARÇAS	GO	345,0	1475,8	26,8	1720,2	1170,2	550,0	305,6
ARAXÁ	MG	1023,6	1545,3	22,1	1064,3	927,5	136,8	617,8
BRASÍLIA	DF	1159,5	1540,3	22,3	1072,1	861,2	210,9	679,2
CATALÃO	GO	840,5	1438,3	24,0	1255,4	987,0	268,4	451,3
FORMOSA	GO	935,2	1345,0	23,6	1200,9	960,7	240,2	384,3
GOIÂNIA	GO	741,5	1602,0	25,3	1428,0	1097,3	330,7	504,7
IPAMERI	GO	773,0	1443,4	23,8	1236,1	980,5	255,6	462,9
ITUIUTABA	MG	560,0	1391,1	25,5	1495,7	1192,7	303,0	198,4
JATAÍ	GO	602,9	1629,5	23,9	1258,5	1126,2	132,2	503,3
PARACATU	MG	712,0	1403,0	24,3	1302,2	1028,0	274,2	375,0
PARANAIBA	MS	331,3	1412,9	25,3	1465,9	1195,4	270,4	217,4
PATOS DE MINAS	MG	940,0	1450,1	22,7	1118,6	908,5	210,1	541,6
PIRENÓPOLIS	GO	740,0	1686,8	24,5	1318,9	1019,4	299,5	667,4
POSSE	GO	825,6	1421,7	25,1	1396,2	964,3	431,9	457,4
RIO VERDE	GO	774,6	1587,8	24,3	1293,8	1088,4	205,4	499,4
RONCADOR	DF	1100,6	1413,4	22,4	1086,1	874,2	211,9	539,2
UNAI	MG	460,0	1333,4	25,7	1520,6	1099,5	421,1	233,9

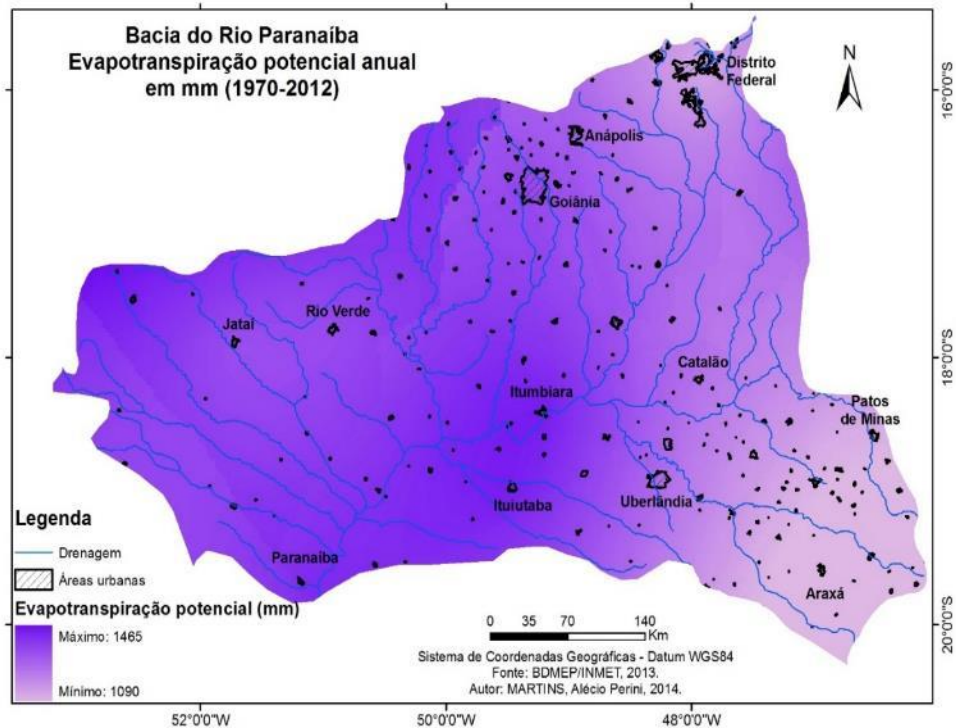
Fonte: BDMEP/INMET, 2012.

No mapa 16, observa-se que os menores valores de evapotranspiração potencial localizam-se na porção nordeste da bacia, no Distrito Federal e na região sudeste, próximo à Serra da Canastra, principalmente em decorrência das temperaturas médias mais baixas. Com exceção de valores isolados próximos às estações de Goiânia, Ituiutaba e Paranaíba, com médias superiores a 1.400mm, as médias de evapotranspiração potencial variam entre 1200mm e 1400mm.

No mapa 17, observa-se que a variação espacial da evapotranspiração real é idêntica à evapotranspiração potencial, porém com valores inferiores, conforme observado na tabela 03, justamente por considerar as restrições hídricas.

O cálculo do balanço hídrico do solo gera como resultados os valores de déficit e excedente hídricos para cada estação, extrapolados por interpolação para as áreas adjacentes.

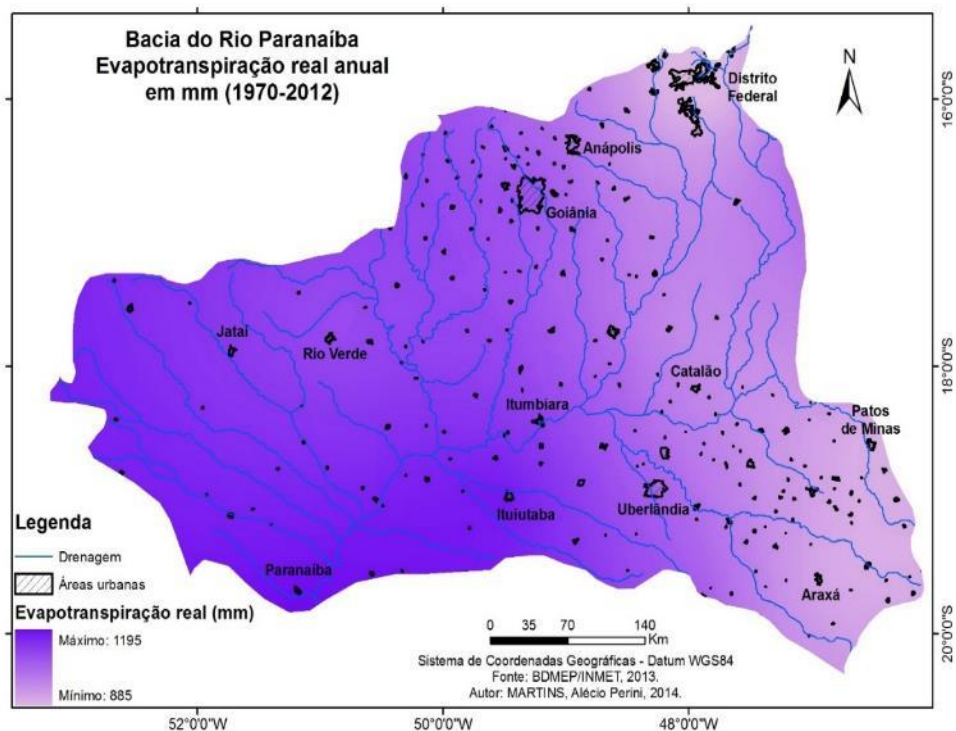
**Mapa 16.** Evapotranspiração potencial média (em mm) na bacia do Rio Paranaíba



Fonte: BDMEP/INMET, 2012

Organização: MARTINS, Alécio Perini, 2014.

**Mapa 17.** Evapotranspiração real média (em mm) na bacia do Rio Paranaíba

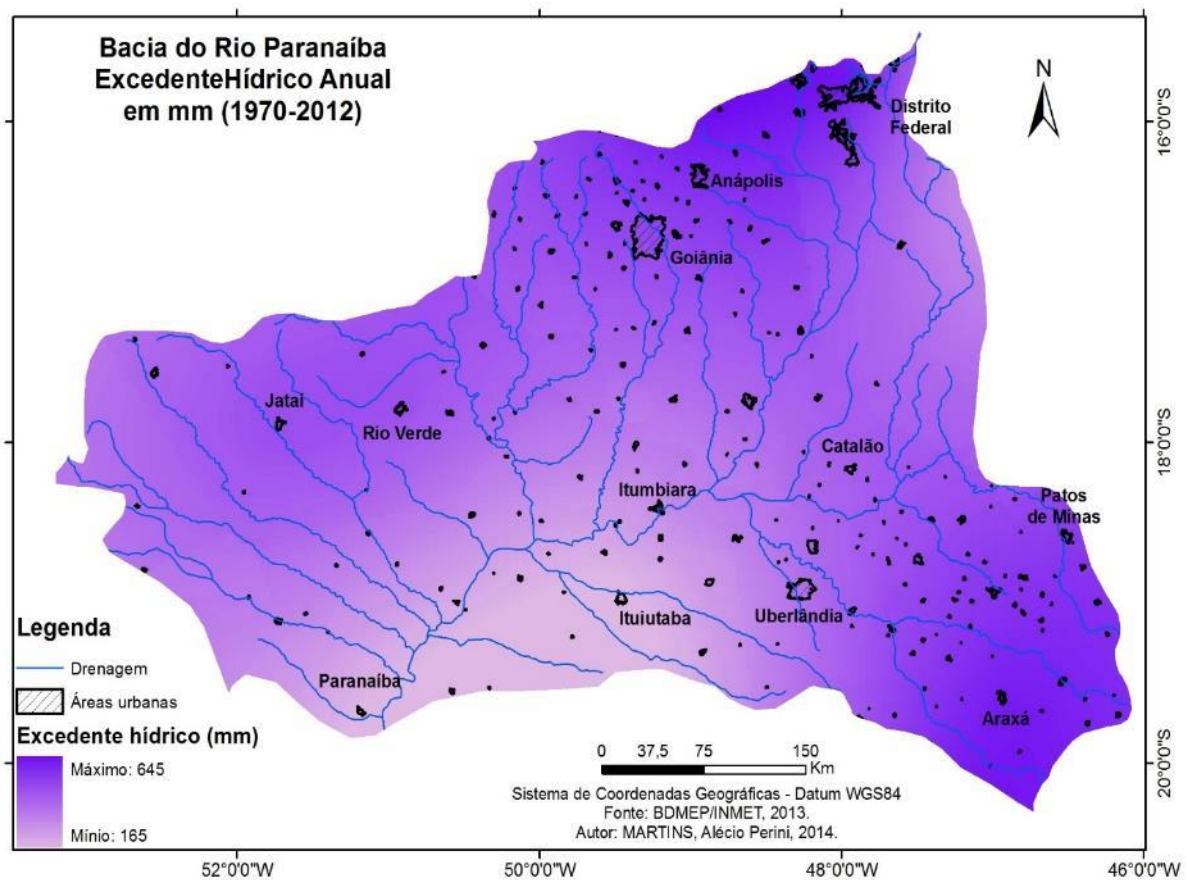


Fonte: BDMEP/INMET, 2012

Organização: MARTINS, Alécio Perini, 2014.

Os maiores valores de excedentes, conforme o mapa 18, concentram-se nas porções norte, nordeste e sudeste da bacia, onde se concentram os maiores valores de precipitação média, associados a principalmente a Latossolos, que apresentam capacidade de armazenamento maior por serem solos mais profundos, porosos e bem estruturados. Os menores valores concentram-se próximos ao médio/baixo curso do Rio Paranaíba, chegando a 217mm anuais na estação de Paranaíba, valor que se mostra impróprio para o cultivo da maioria das variedades agrícolas comerciais.

**Mapa 18.** Excedente hídrico anual médio (em mm) na bacia do Rio Paranaíba.



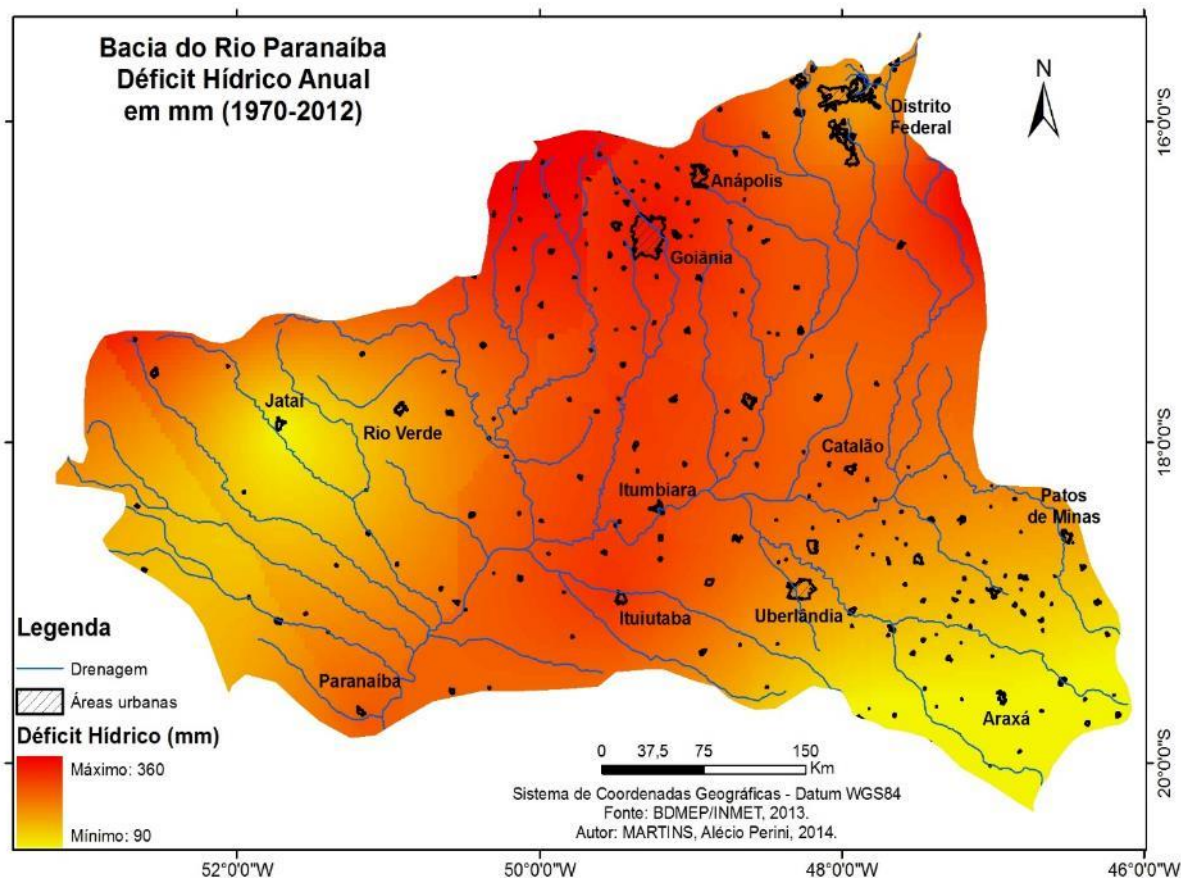
**Fonte:** BDMEP/INMET, 2012

**Organização:** MARTINS, Alécio Perini, 2014.

Já os valores de déficit hídrico anual médio, expostos no mapa 19, não apresentam continuidade espacial clara como os valores de excedente, estando os maiores índices (acima de 300mm) na direção norte/centro da bacia e no Mato Grosso do Sul.



**Mapa 19.** Déficit hídrico anual médio (em mm) na bacia do Rio Paranaíba.



**Fonte:** BDMEP/INMET, 2012

**Organização:** MARTINS, Alécio Perini, 2014.

Valores inferiores a 150mm anuais foram identificados nas regiões de Araxá e Jataí em decorrência dos valores de temperatura e precipitação registrados nessas estações, embora a experiência demonstre que praticamente toda a área da bacia apresente déficits entre 250mm e 300mm, principalmente durante o período seco.

Novamente, o que chama a atenção são os valores extremos, principalmente os déficits hídricos registrados entre maio e outubro, sendo setembro e outubro os meses mais críticos, com reposição da água no solo com as chuvas de outubro acontecendo apenas a partir da segunda quinzena de novembro, quando tem início a safra de grãos na região.

O Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paranaíba, na seção sobre demandas pelo uso de água, apresenta balanço hídrico apenas na perspectiva da demanda de água para a irrigação, não trazendo informações tão importantes para a agricultura, principalmente a agricultura irrigada, relativas a valores de evapotranspiração e reposição de água no solo.

Segundo esse documento, a previsão é que a área agrícola irrigada que, em 2010 era de 608.809ha seja de 965.605 em 20 anos e que as áreas agrícolas sem irrigação passem de 7.849.214ha para 11.333.657ha em 2030 (ANA, 2013, p.138). Essas mudanças previstas para um cenário tendencial para 2030, caso o ritmo de alteração do uso da terra não seja modificado, provoca transformações nos padrões de evapotranspiração e, consequentemente, tendem a modificar os padrões de distribuição espacial e sazonal dos índices de deficiência e excedente hídricos. As alterações nos valores de albedo, índice de vegetação e temperatura de superfície provocam modificações nos valores de evapotranspiração que, a médio/longo prazo, podem interferir na dinâmica de chuvas na região. Nessa previsão, as áreas de pastagens reduziriam de 7.849.214ha para 3.284.889ha.

Na seção 5, os valores de evapotranspiração real foram estimados por sensoriamento remoto e comparados aos valores médios obtidos por interpolação, permitindo uma análise espacial mais detalhada, considerando os diversos usos da terra e cobertura vegetal, bem como o comportamento sazonal dessa variável no ano-teste de 2013.

## **5. APLICAÇÃO DO ALGORITMO SEBAL E DE IMAGENS MODIS/AQUA PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL NA BACIA DO RIO PARANAÍBA**

A evapotranspiração pode ser definida como a forma pela qual a água da superfície terrestre passa para a atmosfera em estado de vapor, sendo uma fração fundamental do ciclo hidrológico. Além da evaporação da água superficial, abrange os processos evaporativos do solo e da vegetação úmida, além da transpiração dos animais e vegetais. Assim, o conhecimento das taxas diárias de evapotranspiração é de grande utilidade para determinar a necessidade hídrica na agricultura, principalmente em áreas irrigadas.

Entre os principais fatores que controlam o processo de evapotranspiração, destacam-se a radiação solar, a temperatura do ar, a velocidade dos ventos, a umidade relativa do ar e a pressão atmosférica, além dos processos de precipitação que são responsáveis pela entrada de água no sistema e disponibilização desse recurso para as plantas e também para a evaporação.

O saldo de radiação líquida ( $R_n$ ) representa a principal fonte de energia para o processo de evapotranspiração e constitui a primeira fase de implementação do modelo SEBAL, dependendo de variáveis como albedo, emissividade e temperatura de superfície para ser estimada. Como é dependente da reflexão da superfície, quanto mais clara a vegetação, maior a reflexão e, portanto, menor a energia disponível, o que explica o fato de florestas densas apresentarem maior potencial de evapotranspiração do que áreas cultivadas ou pastagens.

Já a temperatura exerce papel fundamental para impulsionar o processo de evaporação ao aquecer as superfícies, além de a temperatura do ar provocar um aumento no déficit de saturação por vapor d'água na atmosfera, aumentando a demanda por evaporação. Juntamente com a temperatura, atua a umidade relativa do ar, visto que, quanto menor a umidade, maior a demanda evaporativa e, conseqüentemente, maior a evapotranspiração. Apesar da Umidade Relativa do Ar não ser considerada durante os cálculos de evapotranspiração pelo SEBAL, esses dados são importantes para o cálculo da evapotranspiração de referência ( $E_{To}$ ) de acordo com a metodologia da FAO e para análise em conjunto com os dados de evapotranspiração medidos ou estimados.

A velocidade dos ventos é considerada no processo de estimativa da evapotranspiração via SEBAL, especificamente no cálculo de fluxo de calor sensível, justamente por ser o responsável por remover o vapor d'água das camadas mais próximas ao solo e às plantas e pelo transporte horizontal de energia entre áreas secas e úmidas, aumentando a evapotranspiração.



O termo evapotranspiração pode ser aplicado em várias conceituações, sendo as de evapotranspiração potencial (ou de referência), evapotranspiração real e evapotranspiração da cultura as mais comuns e com maior importância para as atividades agrícolas. Manning (1997), define a evapotranspiração potencial como a perda total de água que ocorre a partir de uma cultura verde e de baixo porte, geralmente grama, em extensa área e que sombreia completamente o chão, onde nunca falta água. Pode ser medida com o uso de lisímetros, sendo considerada como uma “condição ideal” de evapotranspiração. Já a evapotranspiração real, estimada nesse trabalho a partir de modelagem por sensoriamento remoto, ocorre independentemente das condições definidas para a evapotranspiração potencial, isto é, em quaisquer circunstâncias, independente das condições atmosféricas ou dos limites impostos pelas culturas e, portanto, apresentando valores menores do que os apresentados pela evapotranspiração potencial.

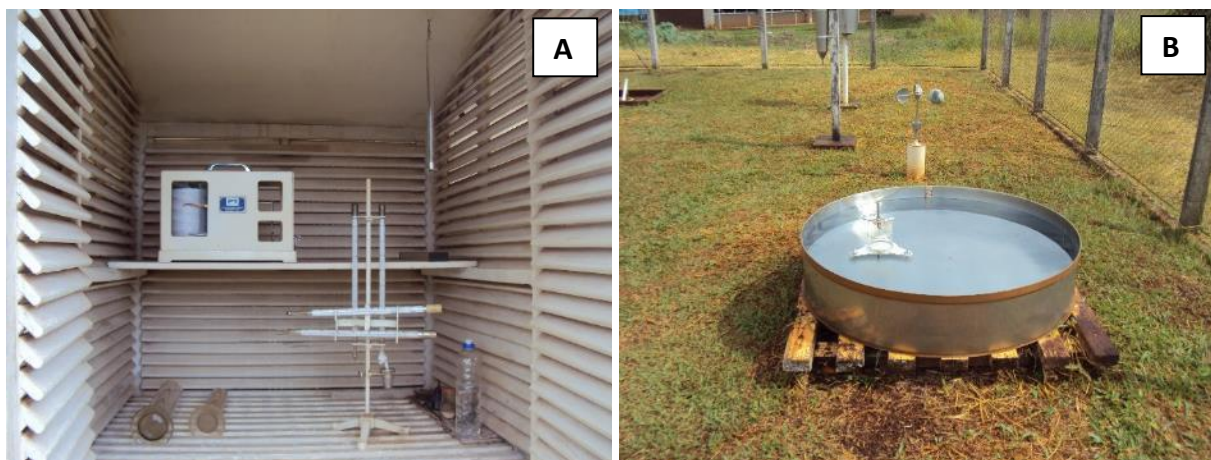
A evapotranspiração da cultura é um termo agrônômico utilizado para indicar a quantidade de água consumida por uma cultura que não apresente restrições hídricas durante o seu desenvolvimento. Esse termo não pode ser estimado via SEBAL, mas para planejamento de atividades agrícolas é fundamental por representar a quantidade de água que necessita ser reposta no solo para manter o desenvolvimento das plantas, mostrando sua importância no estudo e implementação de técnicas de irrigação

Entre as características da vegetação que influenciam diretamente os padrões de evapotranspiração, estão o albedo, que interfere no balanço de energia, a espécie, cujas características morfológicas determinam a transpiração na planta, bem como a profundidade das raízes, a altura das plantas e seu índice de área foliar, que podem aumentar a superfície transpirante.

Outros fatores que podem interferir nos processos de evapotranspiração estão relacionados com a umidade dos solos, visto que alguns solos apresentam características morfológicas que permitem um armazenamento maior ou menor de água e nas técnicas de manejo dos solos e das culturas. Um exemplo claro que poderá ser visto nos resultados encontra-se nos valores de evapotranspiração real registrados em áreas de cerrado e de cultivo de cana-de-açúcar. As áreas de cana apresentam valores de evapotranspiração superiores aos cerrados, justamente em decorrência do manejo do solo e da cultura, bem como o índice de área foliar, que é bem maior do que nas áreas cobertas por vegetação natural esparsa, com gramíneas e árvores de pequeno porte.

Além dos lisímetros, que são equipamentos capazes de medir a evapotranspiração no solo e na vegetação, a evaporação de referência pode ser medida por equipamentos como os evaporímetros de piché e tanques classe A (Foto 1 A e B) que encontram-se instalados em todas as estações climatológicas convencionais do INMET e cujos dados estão disponíveis para download no banco de dados climáticos do INMET (BDMEP).

**Foto 1.** Equipamentos para medição de evaporação (em mm), localizados na estação convencional do INMET de Jataí/GO. Em A, observa-se o interior de um abrigo climatológico com o Evaporímetro de Piché na parte superior. Em B, o Tanque Classe A, com cata-vento ao fundo para medir a velocidade do vento próximo à superfície.



**Autor:** PIRES, Winder, 2015.

Embora apresentem maior nível de precisão, estes métodos restringem-se para escalas de campo ou para áreas com grande densidade de estações e pontos de medição. Áreas com grande extensão geográfica ou de difícil acesso não permitem a estimativa do fluxo de evapotranspiração e, nestes casos, o uso de técnicas de sensoriamento remoto mostra-se como a alternativa mais viável, com a possibilidade de estimar esses valores pontualmente, utilizando como base o pixels do raster, conforme apontam diversos estudos como os de Bezerra (2006); Giacomoni e Mendes (2008) e Nicácio (2008).

O sensoriamento remoto oferece oportunidades promissoras para o fornecimento de dados geográficos relevantes e parâmetros em escala apropriada para uso em modelos hidrológicos distribuídos (STISEN *et al.*, 2008). Atualmente, modelos hidrológicos e técnicas de sensoriamento remoto são meios avançados que permitem a determinação e mapeamento espacial e temporal da evapotranspiração de maneira mais acurada, sem a necessidade de se obter muitos dados de entrada em campo. Em adição, eles têm demonstrado uma melhora no entendimento do balanço hídrico em áreas onde os dados monitorados são escassos (BASTIAANSEN, 2000; IMMERZEEL *et al.*, 2008; WU *et al.*, 2010).

A evapotranspiração para grandes áreas pode ser calculada por imagens (*pixel-a-pixel*), aplicando um conjunto consistente de equações que utilizam dados espectrais de radiância de cada *pixel*. Os métodos que estimam a evapotranspiração por imagens de satélite se mostram muito úteis, pois permitem a sua determinação em diferentes escalas espaciais e em áreas com grande heterogeneidade e dimensão. (UDA, 2012, p.43)

Entre os diversos modelos climato-hidrológicos utilizados para a estimativa da evapotranspiração, como por exemplo o SVAT (*Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer Model*) e o METRIC (*Mapping evapotranspiration at high resolution and with internalized calibration*), optou-se pelo uso do SEBAL, principalmente, em decorrência da extensão da área de estudo, da escassez de dados climatológicos (séries históricas) e da facilidade de operação do modelo, que necessita de poucas informações de campo para estimar a evapotranspiração.

De acordo com o criador do modelo, Bastiaanssen (1995), o desenvolvimento do SEBAL teve como principal estímulo superar problemas apresentados por alguns algoritmos na estimativa de fluxos de superfície a partir de imagens de sensoriamento remoto. Bastiaanssen et al (1998), destacam que os principais problemas apresentados pelo SEBAL relacionam-se à questão de os dados serem instantâneos, o que tornam as estimativas diárias e sazonais relativamente deficientes para escalas mais detalhadas. O maior problema encontrado durante a aplicação do modelo, no entanto, relaciona-se à determinação de variáveis como a resistência aerodinâmica da superfície ( $R_{ah}$ ), a velocidade de atrito dos ventos ( $U^*$ ) e dos coeficientes de rugosidade ( $Z_{om}$ ), que interferem diretamente no cálculo do fluxo de calor sensível e, consequentemente, no calor latente de evaporação e na evapotranspiração.

Poucas estações convencionais apresentam dados de velocidade dos ventos e, além disso, as informações são obtidas apenas 3 vezes por dia. Embora a superfície de observações automáticas do INMET registrem dados horários de velocidade dos ventos, estas estações encontram-se muito mal distribuídas na área de estudo, sendo possível determinar essa variável apenas para o pixel da estação e, as áreas adjacentes, determinadas por krigagem. Como essa variável apresenta uma distribuição muito irregular no ambiente e encontra-se extremamente dependente de padrões de uso da terra e altura da vegetação, sua estimativa pode ocasionar erros no resultado final da modelagem, devendo-se considerar uma altura de 200 metros para o cálculo da resistência aerodinâmica do ar.

Segundo BASTIAANSEN *et al.* (2005), a precisão típica do SEBAL na estimativa da ET real é cerca de 85% para um dia e para escalas da ordem de 1 km<sup>2</sup>. Já considerando medidas sazonais da ET real, a precisão cresce para 95%, enquanto que para a evapotranspiração real anual, em grandes bacias, a precisão é, em média, 96%. Estes mesmos autores sugerem que o SEBAL

pode ser utilizado, dentre outras aplicações, para: 1) estabelecer relação entre o uso da terra e o uso hídrico para fins de planejamento hídrico de uma bacia hidrográfica; 2) avaliar a performance de sistemas de irrigação; 3) entender os impactos ambientais oriundos da extração de água do solo; 4) implementar modelagens hidrológicas; 5) monitorar a degradação da vegetação nativa; 6) estimar a produtividade hídrica das culturas. (NICÁCIO, 2008, p. 57)

Como a grande maioria dos estudos encontrados como base de comparação foram desenvolvidos em áreas temperadas ou semi-áridas e, em maioria, utilizando imagens AVHRR/NOAA ou TM/Landsat, não foi possível comparar os resultados obtidos com trabalhos de outros pesquisadores, embora seja possível fazer inferências nos resultados a partir dos dados de evaporação registrados nas estações convencionais do INMET. Neste estudo, considera-se que a precisão dos dados estimados estejam próximos a 92%, visto que a escala de mapeamento é de 1:2.000.000 (Moreira et. al, 2010).

Conforme o levantamento bibliográfico realizado, a grande maioria das pesquisas que utilizam o SEBAL foram desenvolvidas em regiões do norte do continente africano, oriente médio, áreas com clima mediterrâneo e no meio-oeste dos Estados Unidos. No Brasil, o maior volume de pesquisas encontram-se nas Universidades Federais de Campina Grande, do Rio de Janeiro, Pernambuco, Estadual do Rio de Janeiro e Norte Fluminense, além de grupos de pesquisa vinculados à Embrapa e ao INPE.

Nesta seção, serão apresentadas as imagens utilizadas para calibração e teste do modelo, que consistem nas únicas que não apresentaram cobertura de nuvens para a bacia do Rio Paranaíba no ano-teste de 2013: a primeira, do dia 31 de julho (dia 212 no calendário juliano), e a segunda do dia 02 de agosto (dia 214 no calendário juliano). As imagens foram obtidas, convertidas, classificadas e manipuladas de acordo com os procedimentos e equações descritos na seção 2. Além das imagens utilizadas para calibração, foi escolhida uma imagem com menor percentual de cobertura de nuvens por mês, permitindo uma análise da variação sazonal dos elementos estimados.

Após a geração das imagens por matemática de bandas na ferramenta “Raster Calculator” da extensão Spatial Analyst Tools do ArcGIS 10.1®, as imagens temáticas foram reclassificadas e transformadas em polígonos, agrupados com a ferramenta “Dissolve” em 06 classes. Esses arquivos vetoriais foram cruzados com o mapa de uso da terra e cobertura vegetal com o auxílio da ferramenta “Tabulate areas”, também do Spatial Analyst Tools.

A operação resulta em uma tabela, onde cada classe do mapa temático (albedo, NDVI, evapotranspiração, etc) é cruzada com as categorias de uso da terra e cobertura vegetal,

indicando a área total de cada uso por classe, permitindo a extração de médias, frequência, mediana, entre outras variáveis.

Inicialmente, foram calculados os valores de albedo, que correspondem à reflexão da radiação por cada categoria de uso da terra identificada na superfície. No mapa 20, que corresponde à distribuição espacial dos valores de albedo para o dia 31 de julho, observa-se que os menores valores foram registrados sobre espelhos d'água e, os maiores, sobre áreas de solo descoberto, mais especificamente sobre solos compostos por grandes frações de areia (conforme pode ser comparado com o mapa de uso da terra e cobertura vegetal da bacia do Rio Paranaíba, na seção 3). Como não aconteceram alterações nesses valores do dia 31 de julho para o dia 02 de agosto, apenas um mapa foi representado.

A tabela 4 traz um demonstrativo da variação sazonal dos valores de albedo de superfície, que apresenta maiores médias para o mês de janeiro, em partes pela maior quantidade de nuvens mas, principalmente, ocasionado pela cor clara apresentada pela vegetação, especialmente áreas agrícolas, que aumenta os valores de albedo. Essa variável é importante para diferenciar tipos e estratos de vegetação, já que formações florestais e savânicas apresentam albedos inferiores a 0,12, enquanto que áreas agrícolas e plantios florestais apresentam albedo médio superior a 0,18.

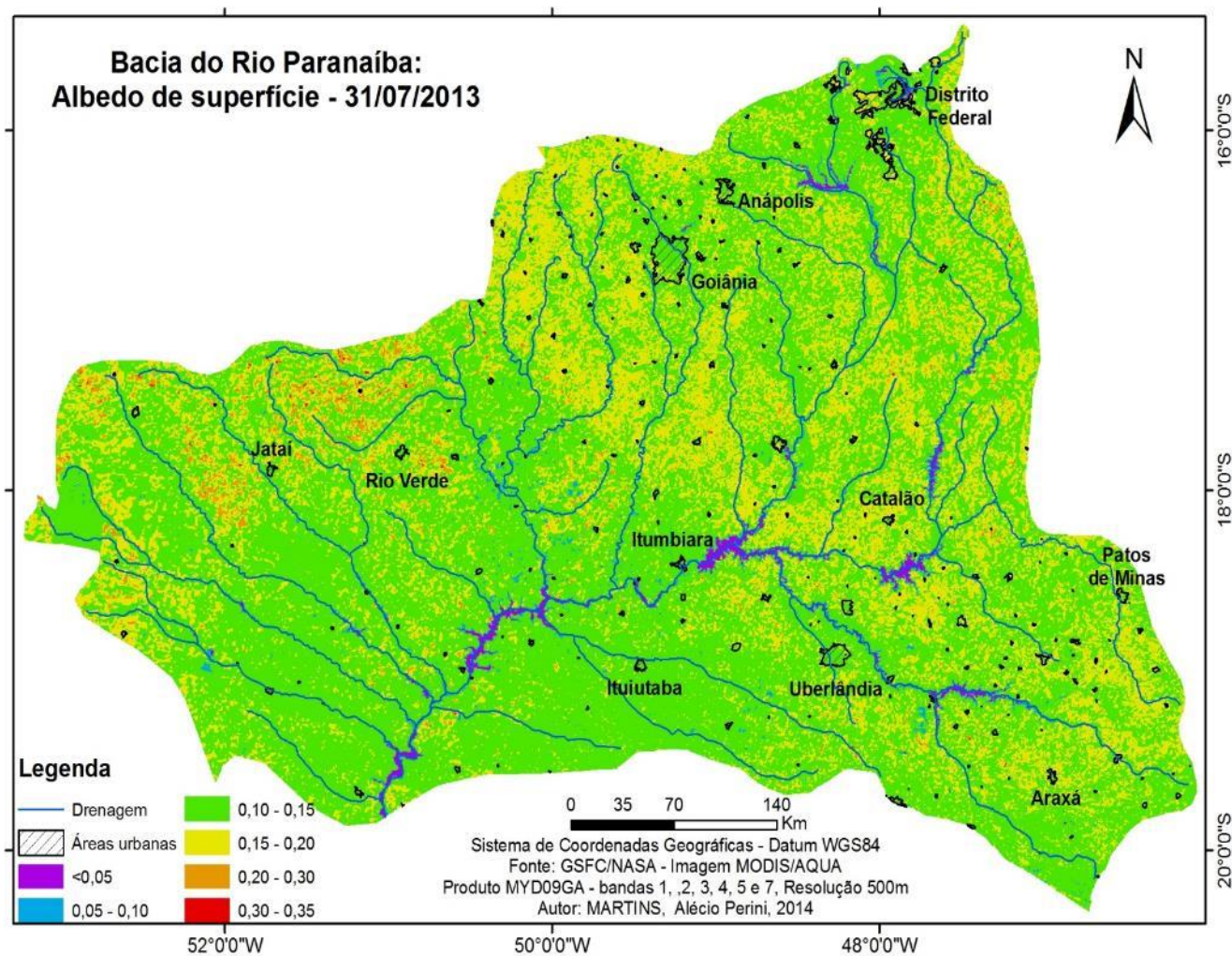
**Tabela 4.** Valores médios de albedo de superfície por categoria de uso da terra e cobertura vegetal obtidos por tabulação cruzada para a Bacia do Rio Paranaíba (2013)

USO	18/1	14/2	14/3	17/4	01/5	13/6	31/7	02/8	26/9	10/10	26/11	04/12	MÉD
AGRICULTURA	0,23	0,20	0,18	0,20	0,18	0,18	0,15	0,15	0,17	0,14	0,20	0,20	0,18
AGRICULTURA IRRIGADA	0,25	0,21	0,18	0,19	0,18	0,17	0,17	0,15	0,19	0,16	0,20	0,21	0,19
ÁGUA	0,03	0,06	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03
ÁREA URBANA	0,21	0,14	0,15	0,14	0,14	0,13	0,13	0,12	0,13	0,16	0,16	0,15	0,15
CERRADO	0,16	0,12	0,13	0,10	0,11	0,11	0,10	0,11	0,11	0,13	0,13	0,11	0,12
FLORESTA	0,13	0,10	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,09	0,10	0,12	0,11	0,11	0,11
PASTAGEM	0,16	0,14	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14	0,13	0,14	0,14	0,15	0,16	0,14
SILVICULTURA	0,24	0,22	0,21	0,19	0,19	0,19	0,15	0,14	0,16	0,17	0,18	0,19	0,19
SOLO DESCOBERTO	0,29	0,17	0,20	0,17	0,20	0,18	0,22	0,22	0,21	0,18	0,22	0,21	0,21

**Fonte:** Imagem MYD09 – MODIS/AQUA, bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, 2013.

Os valores mínimos de albedo foram observados sobre os corpos d'água, que apresentam maior frequência próximo a valores de 0,005, enquanto os maiores valores foram identificados em áreas de solo descoberto, com frequência em torno de 0,21 até valores de 0,34. Com exceção das áreas de agricultura e silvicultura, que apresentaram respostas de albedo acima da faixa de 0,15, todos os demais usos apresentam variações entre 0,10 e 0,15.

**Mapa 20.** Distribuição espacial dos valores instantâneos de albedo na bacia do Rio Paranaíba



Fonte: Imagem MODIS/AQUA de 31 de julho de 2013.

Autor: MARTINS, Alécio Perini, 2015.

Como o pixel apresenta resolução espacial de 250 (bandas 1 e 2) e 500 metros (demais bandas), predominam os valores mais recorrentes dentro daquele pixel, o que explica em partes as áreas urbanas apresentarem albedo médio de 0,15, já que considera diferentes materiais de construção, arborização urbana, sombreamento, entre outros fatores que deixam esses ambientes extremamente heterogêneos e difíceis de serem mapeados com precisão em imagens de média/baixa resolução.

Mendonça et al (2010), ao calcular o albedo de superfície por diferentes metodologias utilizando o sensor MODIS, identificaram valores de 0,14 a 0,18 para áreas de cana-de-açúcar em diferentes períodos do ano, semelhantes aos encontrados neste estudo. Ming e Liu (2010) identificaram, para o estado de São Paulo e por meio do sensor AVHRR/NOAA, valores de 0,10 até 0,15 para áreas de vegetação intensa, semelhantes aos encontrados para estas áreas na bacia do Rio Paranaíba, conforme a tabela 4. Segundo os mesmos autores, áreas de vegetação rasteira, incluindo pastagens e áreas agrícolas, apresentam albedos entre 0,15 e 0,25, dependendo da época do ano.

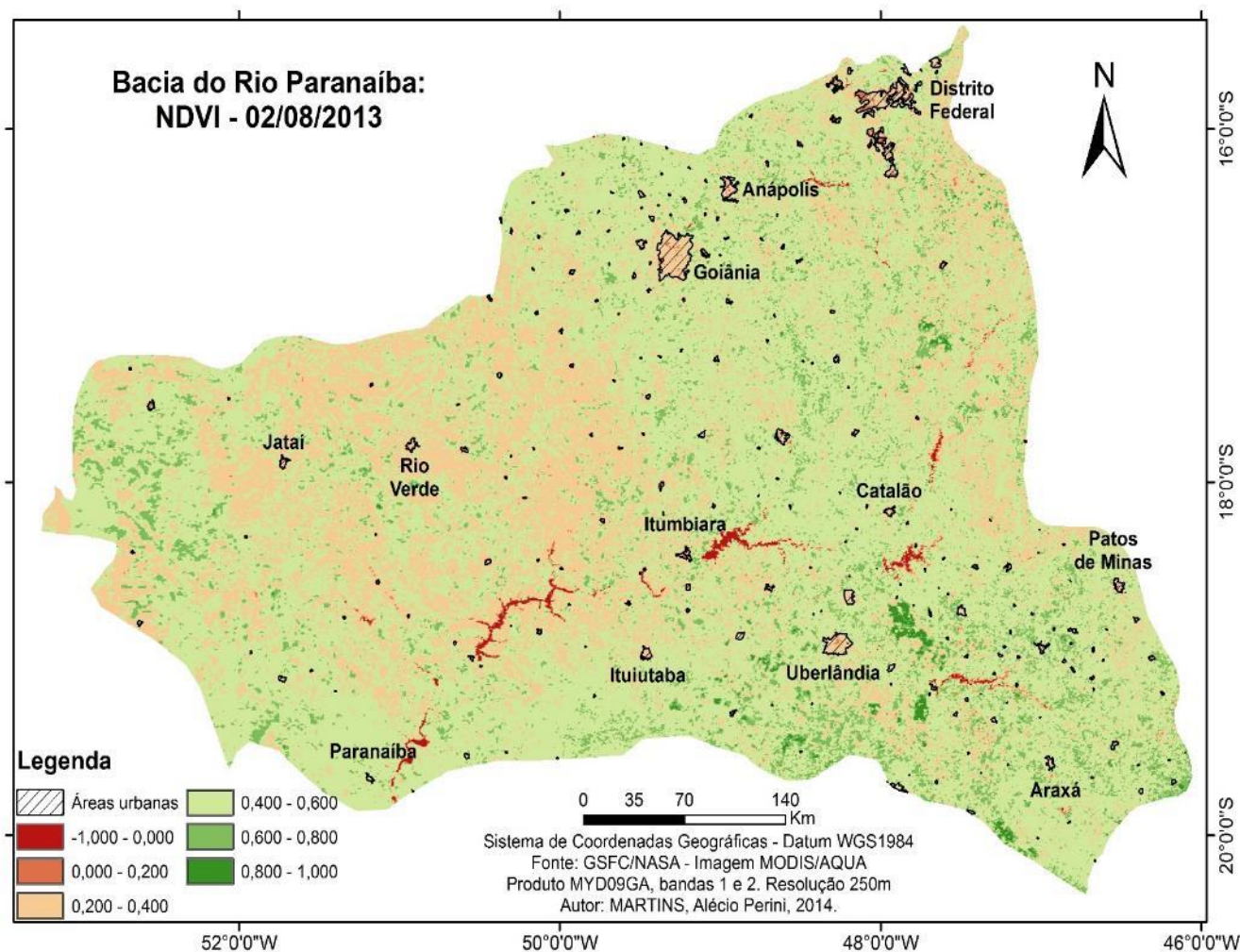
Vale salientar que, alterações na cobertura do solo, podem provocar um aumento nas taxas de albedo e, conseqüentemente, interferir negativamente nos valores de evapotranspiração.

Após a elaboração dos mapas de albedo, foi necessário extrair o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) de cada pixel, gerando índices que variam de -1 (para áreas sem nenhuma cobertura vegetal, como por exemplo os espelhos d'água) até +1, indicando que, quanto mais próximo de 1 é o índice apresentado, maior a densidade da vegetação verde. A obtenção desse índice é possível a partir das bandas que captam respostas espectrais na faixa do vermelho (banda 1) e infravermelho próximo (banda 2), gerando imagens com resolução espacial de 250m. Foram encontrados valores de -1 até aproximadamente 0,9, sendo estes últimos identificados em áreas de silvicultura e floresta.

No mapa 21, que demonstra os índices de vegetação para o dia 02 de agosto de 2013, observa-se uma predominância de índices entre 0,4 e 0,6, que correspondem às áreas de pastagens e cerrados que, nessa época do ano, apresentam respostas espectrais muito parecidas. Durante a classificação supervisionada, foi possível perceber que algumas áreas de cana-de-açúcar nas regiões de Itumbiara, Quirinópolis e Ituiutaba também apresentaram índices inferiores a 0,6, o que está relacionado com o estágio fenológico da cultura (Fotos 2 e 3).



**Mapa 21.** Distribuição espacial dos valores instantâneos de índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) na bacia do Rio Paranaíba



Fonte: Imagem MODIS/AQUA de 02 de agosto de 2013.

Autor: MARTINS, Alécio Perini, 2015.



**Foto 2.** Lavoura de cana-de-açúcar no município de Ituiutaba no mês de agosto de 2013, com resposta no NDVI na faixa de 0,65.



Autora: CAMPOS, N. L., agosto de 2013.

**Foto 3.** Lavoura de cana-de-açúcar no município de Ituiutaba/MG no mês de junho de 2013 em estágio inicial. Como o índice de área foliar ainda é baixo, os valores de evapotranspiração são inferiores aos registrados na situação da foto 2. Em segundo plano é possível observar área de irrigação por aspersão.



Autora: GARCIA, T. S., junho de 2013.

Espelhos d'água e áreas úmidas ficaram classificadas com índices de -1,00 até 0,200, enquanto que solos descobertos (áreas agrícolas em pousio), áreas urbanas e algumas feições de campo limpo, como por exemplo no Parque Nacional das Emas, apresentaram índices entre 0,200 e 0,400, assim como áreas de pastagem degradada. Áreas de agricultura apresentam índices entre 0,6 e 0,7, conforme observado na tabela 5 e, por se tratar de uma imagem do período seco, correspondem em sua maioria a lavouras irrigadas e áreas de plantio de cana-de-açúcar, que apresentam ciclos de 10 a 18 meses. Algumas feições florestais, principalmente Florestas Estacionais e áreas de cerrado mais denso (Cerradão) também apresentaram resposta de índice de vegetação em faixas entre 0,7 e 0,8, representadas no mapa 21 pela cor laranja. Já as áreas apresentadas em vermelho, com índices acima de 0,8, representam plantios florestais (silvicultura de pinus, eucalipto e seringueira, predominantemente), além de pequenos residuais de florestas mais densas.

Conforme a tabela 5, que demonstra a variação sazonal dos valores de NDVI para cada tipo de uso da terra e cobertura vegetal, verifica-se que os maiores índices são registrados entre dezembro e abril (período chuvoso), principalmente pelos altos índices registrados por áreas de cultivo agrícola de sequeiro. Não existem grandes variações nos índices apresentados por corpos d'água, áreas urbanas e regiões com solo descoberto. As maiores variações sazonais são registradas em pastagens, evidenciando os efeitos negativos da estiagem sobre essas áreas entre os meses de maio e outubro.

**Tabela 5.** Valores médios de NDVI por categoria de uso da terra e cobertura vegetal obtidos por tabulação cruzada para a Bacia do Rio Paranaíba (2013)

USO	18/1	14/2	14/3	17/4	01/5	13/6	31/7	02/8	26/9	10/10	26/11	04/12	MÉD
AGRICULTURA	0,86	0,91	0,80	0,90	0,87	0,78	0,65	0,64	0,66	0,62	0,81	0,89	0,78
AGRICULTURA IRRIGADA	0,86	0,91	0,80	0,86	0,82	0,81	0,79	0,79	0,73	0,64	0,80	0,91	0,81
ÁGUA	-0,60	-0,30	-0,60	-0,70	-0,76	-0,55	-0,60	-0,60	-0,46	-0,66	-0,64	-0,70	-0,60
ÁREA URBANA	0,21	0,32	0,30	0,26	0,27	0,28	0,21	0,20	0,23	0,23	0,26	0,32	0,26
CERRADO	0,68	0,62	0,68	0,68	0,65	0,60	0,50	0,51	0,45	0,45	0,55	0,61	0,58
FLORESTA	0,76	0,85	0,82	0,83	0,82	0,76	0,69	0,72	0,68	0,70	0,86	0,87	0,78
PASTAGEM	0,65	0,71	0,63	0,68	0,63	0,57	0,45	0,46	0,36	0,53	0,55	0,63	0,57
SILVICULTURA	0,86	0,91	0,89	0,92	0,92	0,84	0,84	0,89	0,82	0,86	0,89	0,82	0,87
SOLO DESCOBERTO	0,30	0,25	0,30	0,33	0,29	0,27	0,26	0,27	0,24	0,27	0,29	0,33	0,28

Fonte: Imagem MYD09 – MODIS/AQUA, bandas 1 e 2, 2013.

Também foram elaborados mapas de índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI), que elimina os efeitos do solo no mapeamento de áreas vegetadas, assim como os mapas de índice de área foliar da vegetação, que são necessários para calcular a emissividade da superfície, variável importante na estimativa da radiação de onda longa emitida pela superfície.

Ferreira e Meirelles (2011), ao implementar o algoritmo SEBAL para estimativa de evapotranspiração na mesorregião Sul Goiano, destacam um valor médio de NDVI de 0,62 para o dia 06 de março de 2010, valor semelhante ao encontrado com a implementação do modelo para a mesma região na bacia do Rio Paranaíba em 14 março de 2013, sendo os maiores valores registrados em áreas de mata ciliar e de galeria e áreas agrícolas, conforme a tabela 5.

Outra variável importante para compor a equação de saldo de radiação à superfície é a temperatura de superfície, necessária para o cálculo das radiações de onda longa incidente e refletida. As informações de temperatura, calculadas em graus Kelvin e posteriormente convertidas para graus Celsius ( $K-273,15$ ), são extraídas do produto MYD11A1 do sensor MODIS/AQUA, para o mesmo instante de obtenção das imagens MYD09GA utilizadas no saldo de radiação, conforme descrito no capítulo 02.

Analisando os mapas 22 e 23, que demonstram respectivamente as informações de temperatura de superfície (TST) para os dias 31 de julho e 02 de agosto, observa-se que não existe grandes variações espaciais em relação às classes, embora os valores variem por depender das condições do tempo atmosférico no dia de obtenção da imagem, conforme pode ser observado na tabela 6, que apresenta a variação sazonal da temperatura de superfície na bacia do Rio Paranaíba.

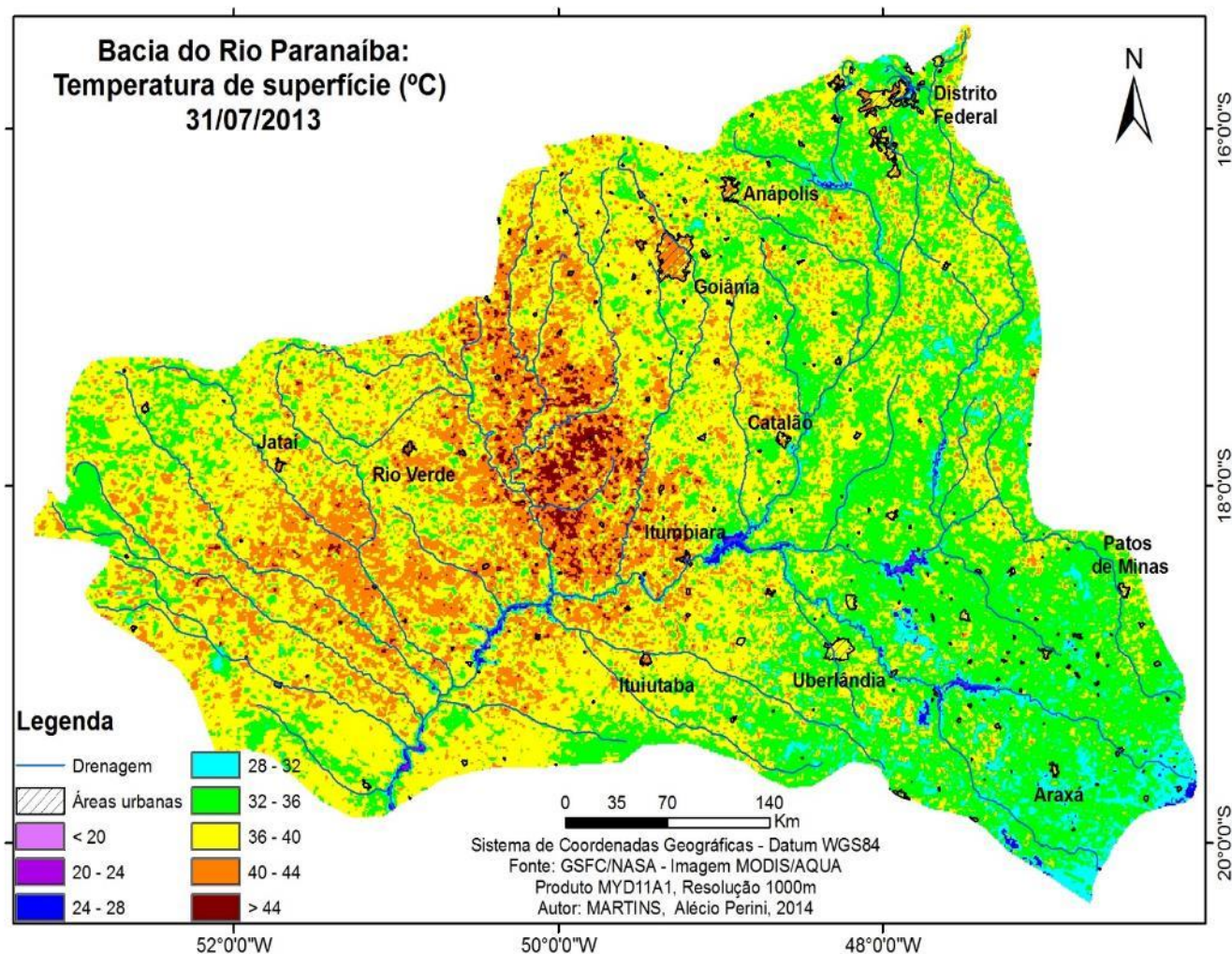
**Tabela 6.** Valores médios temperatura de superfície – TST (°C) por categoria de uso da terra e cobertura vegetal obtidos por tabulação cruzada para a Bacia do Rio Paranaíba (2013)

USO	18/1	14/2	14/3	17/4	01/5	13/6	31/7	02/8	26/9	10/10	26/11	04/12	MÉD
AGRICULTURA	32,1	32,2	31,0	28,2	27,8	27,0	35,7	34,6	35,8	35,4	31,7	31,6	31,9
AGRICULTURA IRRIGADA	31,5	31,0	30,0	29,2	28,7	27,3	32,3	33,2	36,7	32,1	32,6	33,4	31,5
ÁGUA	29,2	31,1	28,6	27,5	27,4	25,1	24,4	26,9	25,7	25,6	29,2	30,0	27,6
ÁREA URBANA	43,0	43,2	37,3	40,4	41,3	37,0	41,2	41,7	44,5	42,3	39,8	42,5	41,2
CERRADO	35,2	37,2	32,3	32,6	33,6	30,3	34,7	35,4	41,0	33,4	36,1	35,0	34,7
FLORESTA	32,0	33,3	31,0	29,4	30,2	28,0	32,3	33,4	38,1	32,4	31,5	33,4	32,1
PASTAGEM	36,7	37,4	33,9	31,8	35,4	32,9	38,4	38,4	41,9	41,4	39,7	38,6	37,2
SILVICULTURA	29,6	27,3	27,9	26,2	26,0	23,7	28,2	29,2	33,3	28,3	29,2	30,3	28,3
SOLO DESCOBERTO	38,6	43,3	38,3	40,4	42,9	40,9	43,6	42,9	49,1	46,6	41,6	41,5	42,5

Fonte: Imagem MYD11A1 – MODIS/AQUA, 2013.

As maiores temperaturas, acima de 44 graus e com picos de até 48 foram registradas em áreas de solo exposto, predominantemente arenoso, com maior ocorrência no dia 31 de julho de 2013. Já as temperaturas entre 40 e 44 graus foram observadas em área de solo exposto, que correspondem a áreas agrícolas em pousio, manchas urbanas de cidades de médio/grande porte e áreas de pastagens degradadas.

**Mapa 22.** Distribuição espacial dos valores instantâneos de temperatura superficial (°C) a bacia do Rio Paranaíba

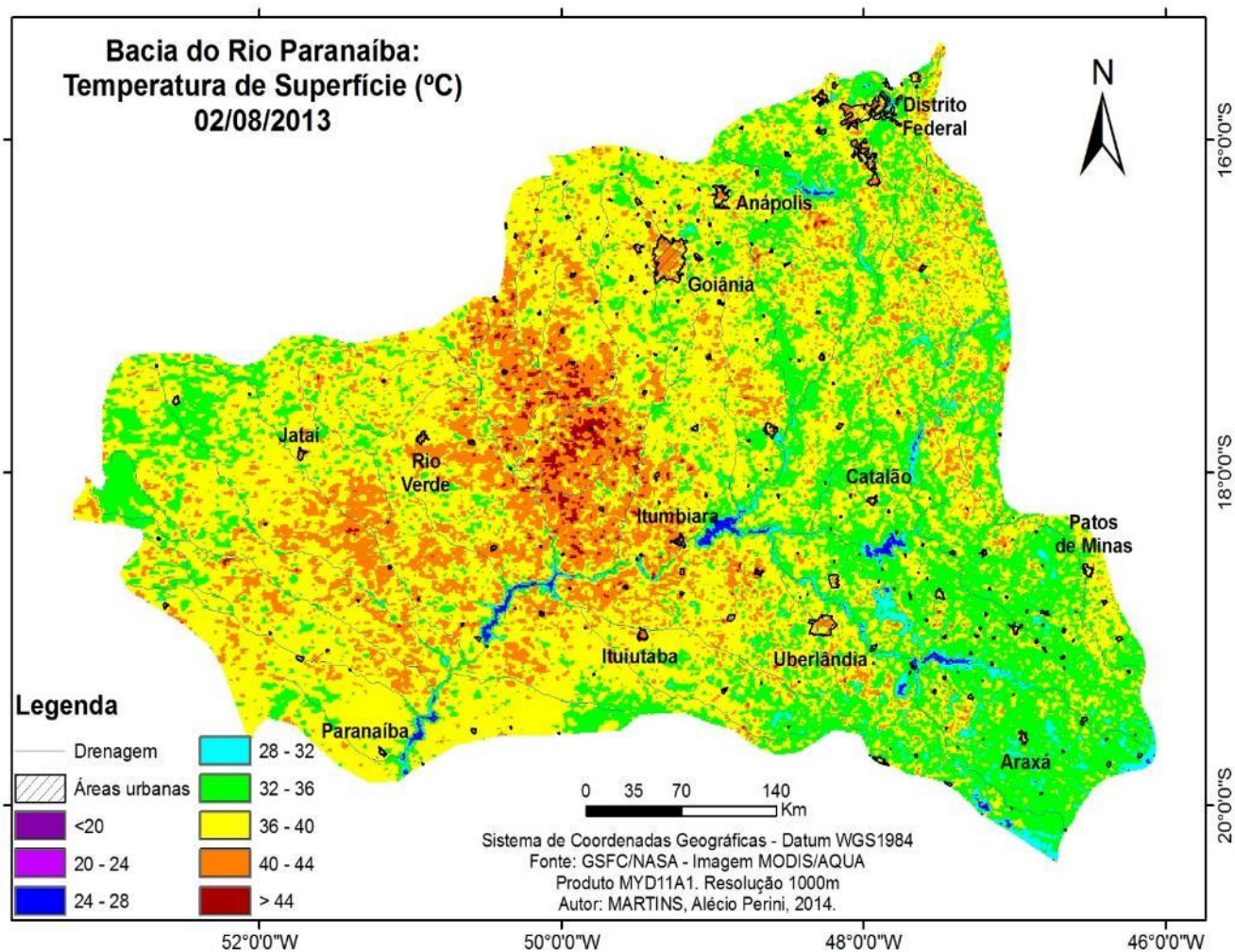


Fonte: Imagem MODIS/AQUA de 31 de julho de 2013.

Autor: MARTINS, Alécio Perini, 2015.



**Mapa 23.** Distribuição espacial dos valores instantâneos de temperatura superficial (°C) a bacia do Rio Paranaíba



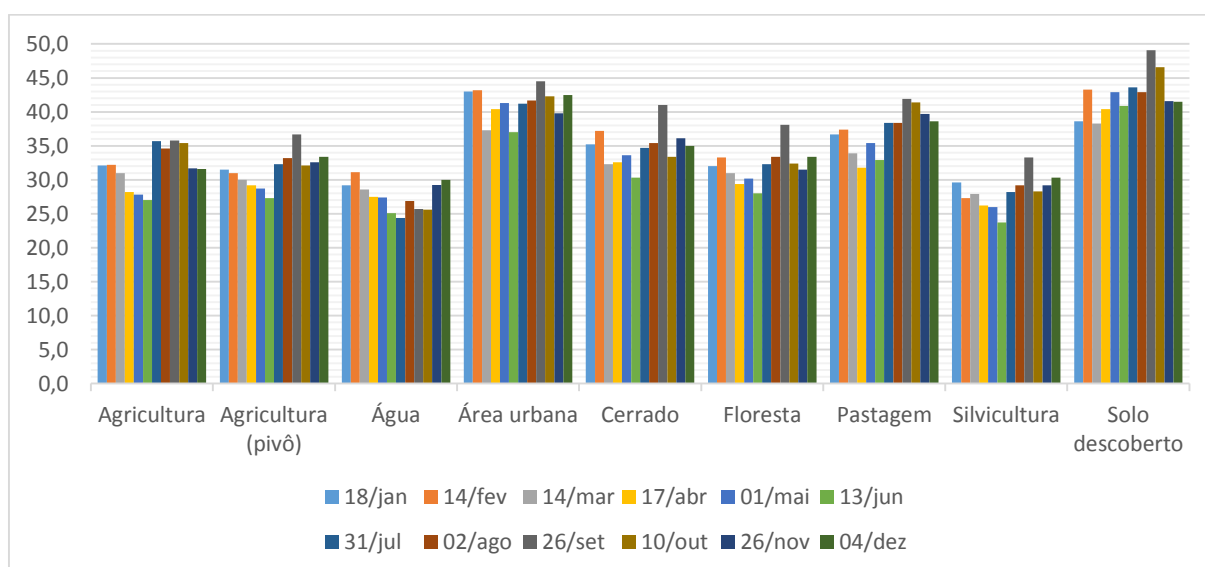
Fonte: Imagem MODIS/AQUA de 02 de agosto de 2013.

Autor: MARTINS, Alécio Perini, 2015.

As áreas de pastagens e a maioria das feições de cerrado apresentam temperaturas entre 36 e 40 graus, apesar de que em áreas com altitudes superiores a 900m essa temperatura fique próxima aos 35 graus. Os locais que concentram práticas agrícolas apresentaram temperaturas na faixa de 32 a 36 graus, assim como áreas de pastagem cultivada e, nesse caso, as técnicas de manejo interferem positivamente no balanço de energia.

Algumas áreas de cerrado mais fechado também enquadram-se nessa faixa de temperatura superficial (de 34° a 35°), visto que quanto mais densa a vegetação, menor os valores de temperatura apresentados. Essa afirmação pode ser comprovada com a análise da variação da temperatura em áreas cobertas por Florestas Estacionais e de cultivo florestal, com temperaturas entre 28 e 32 graus, sendo que foram observadas temperaturas mais baixas em áreas de silvicultura. Apenas áreas cobertas por corpos d'água apresentaram temperaturas inferiores a 28°C em ambos os dias estudados. Essa tendência de variação de acordo com a categoria de uso da terra e cobertura vegetal, pode ser melhor visualizada no Gráfico 1 que, demonstra ainda, que os valores mais baixos foram registrados no mês de junho e, os valores mais altos, nos meses de setembro e outubro, com picos no final de setembro, auge do período seco na região.

**Gráfico 1.** Variação sazonal da temperatura de superfície – TST (°C) por categoria de uso da terra na bacia do Rio Paranaíba.



Martins e Rosa (2014), ao comparar os dados de temperatura obtidos em superfície às informações registradas na rede de estações automáticas do INMET, encontraram correlação

média de 0,7 entre os dados, indicando forte correlação tanto pontual quanto sazonal entre os dados de temperatura na bacia do Rio Paranaíba.

A partir dos valores de albedo, temperatura de superfície, NDVI, SAVI, índice de área foliar e emissividade, em conjunto com constantes e parâmetros físicos para o cálculo das radiações de onda curta e longa, incidentes ou refletidas, foi possível calcular o balanço de energia na superfície da bacia do Rio Paranaíba, expostos nos mapas 24 e 25 para os dias 31 de julho e 02 de agosto, respectivamente. Na tabela 7, é possível observar a variação sazonal do saldo de radiação à superfície, que apresenta valores mais elevados no mês de dezembro (início do verão), com dias mais longos, temperaturas mais elevadas, além de receber radiação solar em ângulos menos inclinados.

O saldo de radiação vai ser a principal variável na definição dos fluxos de calor no solo e sensível, que agem diretamente na quantidade de água que retorna à atmosfera por evapotranspiração. Quanto maior o saldo de radiação, maior será a evapotranspiração real. Percebe-se que esses valores são inversamente proporcionais aos valores de albedo, visto que quanto menor a reflexão, maior o saldo de radiação. Consequentemente, os valores de evapotranspiração serão mais elevados.

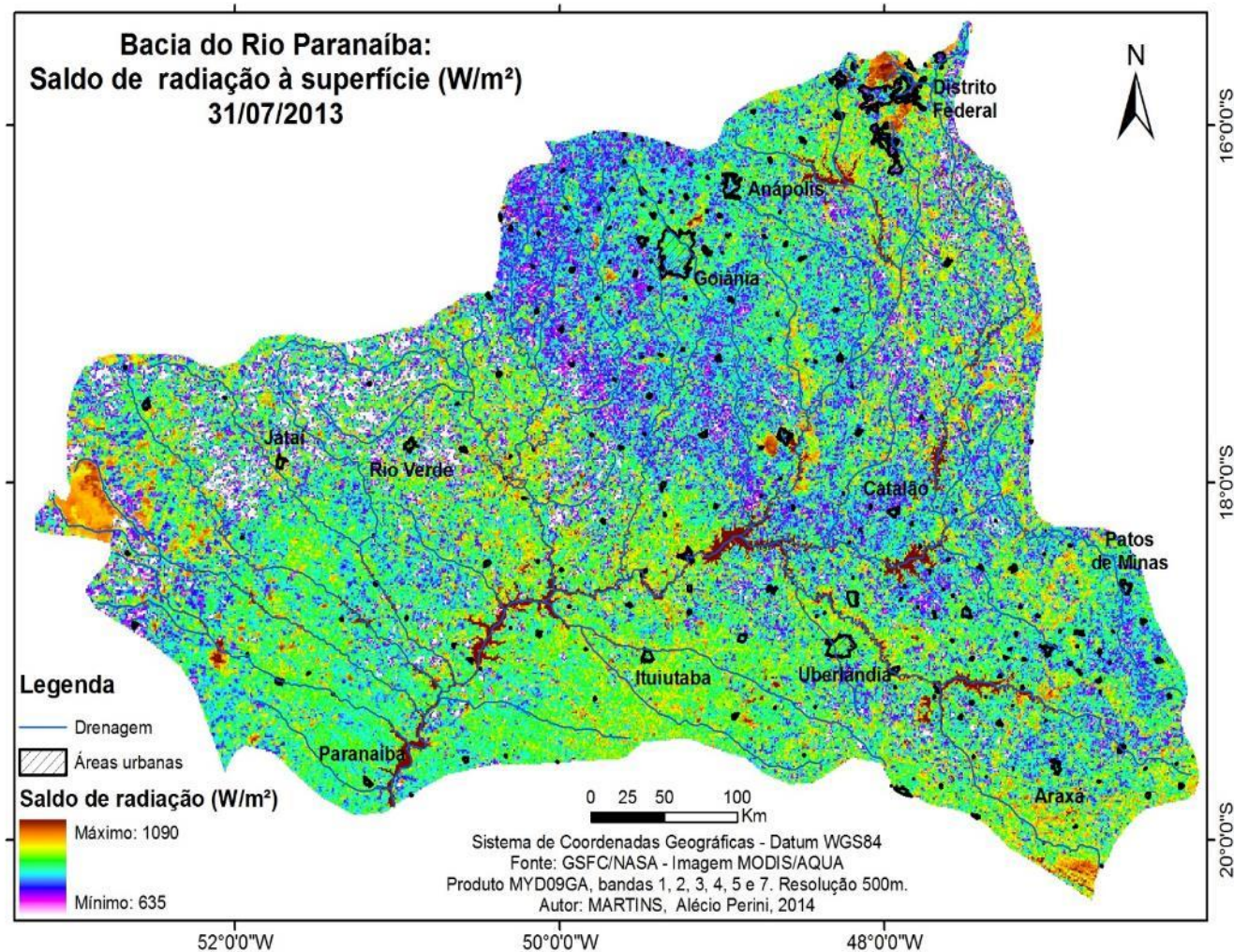
A relação direta entre albedo e saldo de radiação à superfície é comprovada pelo coeficiente de correlação calculado a partir das médias anuais por categoria de uso da terra, que é de 0,97. Isso evidencia que, mudanças bruscas nos padrões de uso da terra e cobertura vegetal alteram significativamente os valores de albedo e, consequentemente, do saldo de radiação e no calor latente responsável pela transformação da água do estado líquido para o estado de vapor.

**Tabela 7.** Valores médios do saldo final de radiação à superfície ( $W/m^2$ ) por categoria de uso da terra e cobertura vegetal obtidos por tabulação cruzada para a Bacia do Rio Paranaíba (2013).

USO	18/1	14/2	14/3	17/4	01/5	13/6	31/7	02/8	26/9	10/10	26/11	04/12	MÉD
AGRICULTURA	693,6	702,4	718,7	692,8	909,2	926,4	767,8	701,1	935,0	974,0	922,5	916,0	821,6
AGRICULTURA IRRIGADA	647,2	669,1	720,2	687,2	902,4	934,4	742,9	710,1	908,8	960,3	886,6	924,0	807,8
ÁGUA	911,5	855,1	879,4	874,2	1116,2	1131,6	924,1	876,0	1139,2	1173,3	1187,0	1182,0	1020,8
ÁREA URBANA	745,0	750,0	837,5	722,6	952,3	946,6	781,3	725,2	957,8	945,2	982,8	1024,0	864,2
CERRADO	723,2	760,6	742,8	772,2	996,6	989,6	820,4	759,3	1006,2	961,2	990,3	1063,0	882,1
FLORESTA	746,6	789,8	745,5	756,8	981,3	996,8	819,5	766,6	996,4	995,0	1037,3	1022,5	887,8
PASTAGEM	742,0	766,8	724,7	746,3	960,7	967,0	785,3	719,1	959,6	972,4	970,5	994,8	859,1
SILVICULTURA	676,0	797,6	695,0	724,0	926,9	955,0	793,4	725,8	967,2	982,0	939,6	941,5	843,7
SOLO DESCOBERTO	577,8	729,4	764,6	707,8	897,2	926,4	712,4	640,2	901,6	899,6	900,1	883,0	795,0

**Fonte:** Imagem MYD09GA – MODIS/AQUA, 2013.

**Mapa 24.** Distribuição espacial do saldo de radiação à superfície ( $\text{W/m}^2$ ) na bacia do Rio Paranaíba

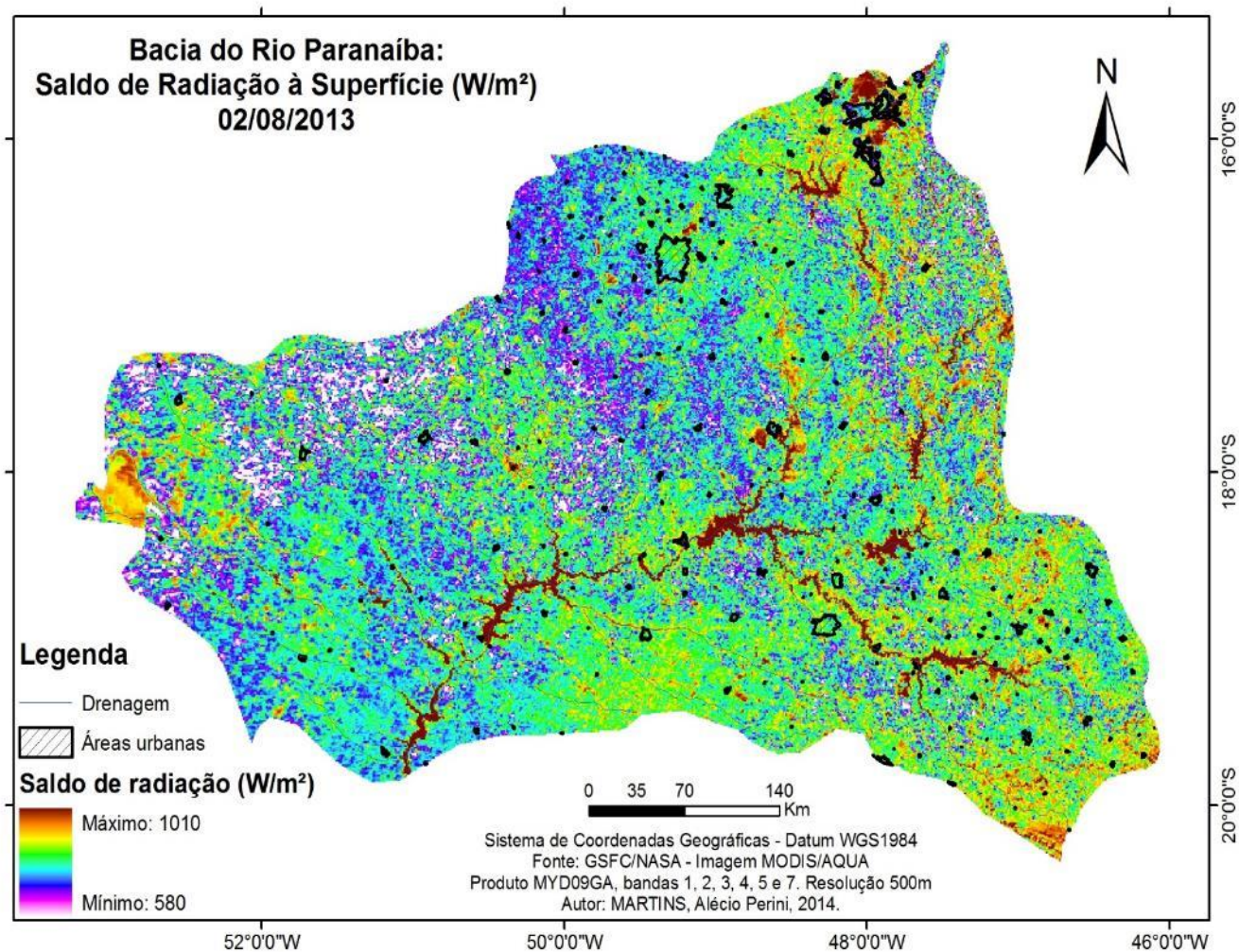


Fonte: Imagem MODIS/AQUA de 31 de julho de 2013.

Autor: MARTINS, Alécio Perini, 2015.



**Mapa 25.** Distribuição espacial do saldo de radiação à superfície ( $\text{W/m}^2$ ) na bacia do Rio Paranaíba



Fonte: Imagem MODIS/AQUA de 02 de agosto de 2013.  
Autor: MARTINS, Alécio Perini, 2015.

Os mapas foram gerados utilizando a mesma quantidade de classes, mesmos intervalos e mesmas cores para que fossem evidentes as diferenças entre o balanço final de radiação calculados com 2 dias de diferença, principalmente em decorrência da temperatura de superfície registrada nesses dois momentos, visto que o albedo e a emissividade praticamente não tiveram alterações em seus valores. Foram registrados valores mais altos de radiação no dia 31 de julho, o que explica também os valores mais elevados de evapotranspiração.

Áreas com vegetação arbórea, incluindo florestas, cerrados e áreas de silvicultura também apresentam valores altos de  $R_n$ , acima de  $800\text{W/m}^2$  em 31/07 e de  $750\text{W/m}^2$  em 02/08. Estas classes, apesar das diferenças nos valores, apresentam limites coincidentes nas duas imagens. Algumas regiões ocupadas com agricultura também apresentam respostas nessa faixa em ambas as imagens.

Os valores médios do saldo de radiação, bem como os valores medianos encontram-se na faixa de  $750$  a  $800\text{ W/m}^2$  no dia 31 de julho e de  $700$  a  $750\text{W/m}^2$  no dia 02 de agosto, coincidindo com áreas ocupadas por pastagens e feições de cerrado, além de áreas ocupadas com agricultura.

Os menores valores registrados, abaixo de  $750\text{W/m}^2$  no mapa 24 e abaixo de  $700\text{W/m}^2$  no mapa 25, correspondem às áreas com solo descoberto e com maior teor de areia, que também foram as áreas que apresentaram maiores valores de albedo e de temperatura de superfície. Nessas áreas, que também incluem alguns pixels de áreas urbanizadas, registram-se picos de fluxo de calor e baixos valores de evapotranspiração, visto que a quantidade de água no solo disponível para esses processos é praticamente zero.

Nicácio (2008), ao mapear o saldo de radiação à superfície ( $R_n$ ) para as regiões de Juazeiro e Petrolina, no nordeste brasileiro, para imagens dos meses de outubro e novembro, encontrou valores de  $R_n$  próximos a  $731\text{ W/m}^2$  para corpos hídricos, enquanto que esses valores para a bacia do Rio Paranaíba foram superiores a  $1100\text{ W/m}^2$  para o mesmo período. Ferreira e Meirelles (2011) encontraram valores médios de  $825\text{W/m}^2$  de  $R_n$  para o dia 06/03/2010 para a mesorregião Sul de Goiás, enquanto que a média para o dia 14/03/2013 foi de  $759\text{ W/m}^2$ , de acordo com o estudo aqui apresentado. Percebe-se, assim, que os valores de  $R_n$  variam muito de acordo com as condições climáticas da região e do dia, visto que todos os estudos citados utilizaram a mesma metodologia e imagens do mesmo sensor, não tendo muito sentido a comparação destes valores com os obtidos em outros estudos.

A partir do saldo de radiação, dos dados de temperatura de superfície, albedo e índice de vegetação, foi possível estimar o fluxo de calor no solo, quando deve-se tomar cuidado com a estimativa desses valores para superfícies cobertas por água. Os resultados obtidos e que podem ser visualizados nos mapas 26 e 27, assim como na tabela 8, indicam que o fluxo de calor é maior sobre superfícies líquidas, sendo superiores a  $200 \text{ W/m}^2$  para os dias 31/07 e 02/04, valores extremamente altos, mas que se justificam pela época de obtenção das imagens e pelas características climáticas regionais durante o período seco. Ferreira e Meirelles (2011), ao mapearem o fluxo de calor no solo para a mesorregião Sul Goiano, utilizando imagem do mês de março, identificaram valores máximos de  $219 \text{ W/m}^2$ , enquanto Nicácio (2008) encontrou valores de até  $247 \text{ W/m}^2$  para o mês de novembro na região de Petrolina/PE, indicando que os valores mapeados encontram-se dentro do esperado para a região.

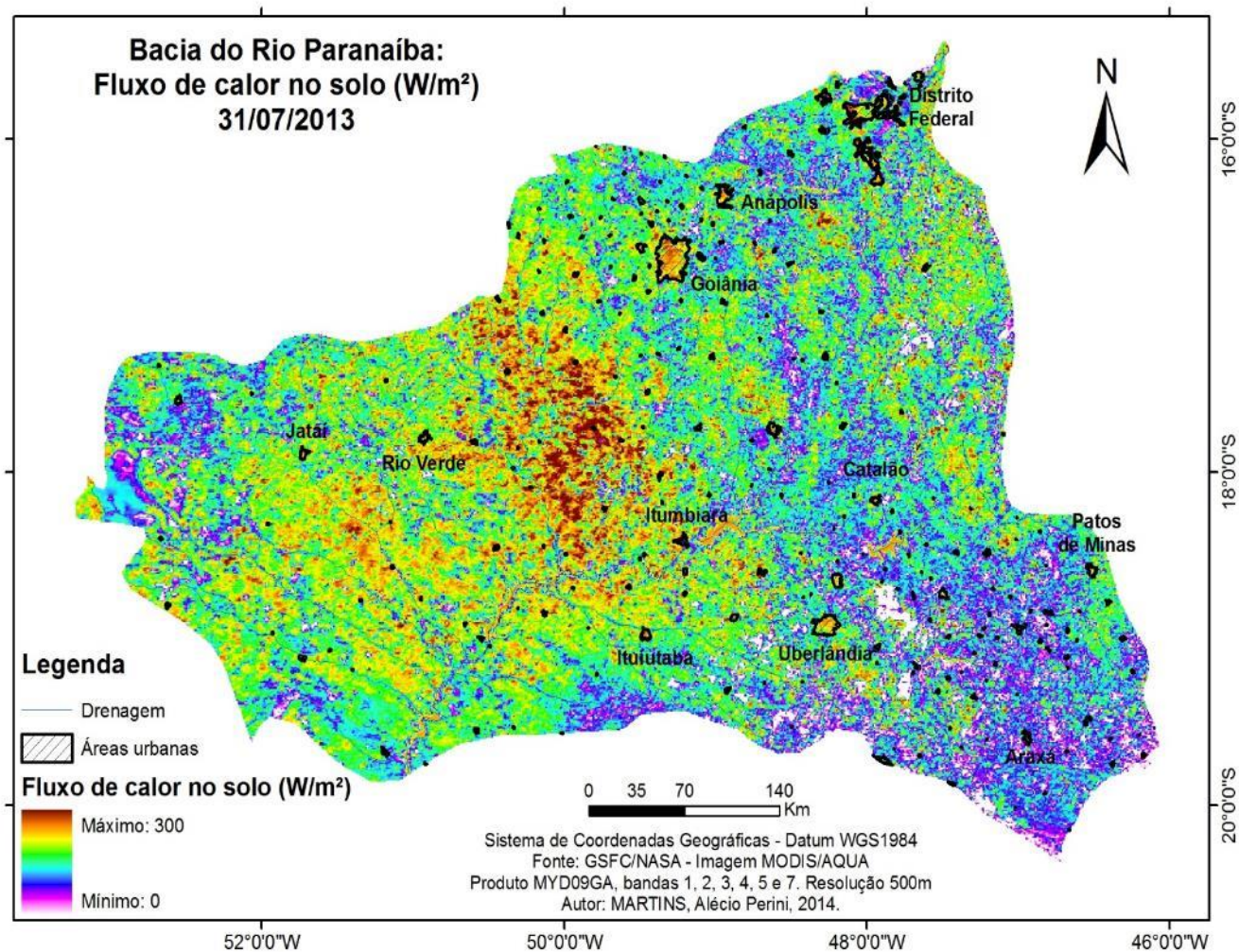
Allen et al (2002) colocam alguns valores de referência de estimativa do fluxo de calor no solo dividido pelo balanço de radiação, indicando valores entre 0,05 e 0,15 para agricultura, enquanto que esse valor no mapeamento realizado foi de 0,13. A referência para áreas de solos descobertos é de 0,2 a 0,4, enquanto os resultados do mapeamento apontam valores médios de 0,22, indicando que o mapeamento apresentou resultados satisfatórios.

**Tabela 8.** Valores médios do fluxo de calor no solo ( $\text{W/m}^2$ ) por categoria de uso da terra e cobertura vegetal obtidos por tabulação cruzada para a Bacia do Rio Paranaíba (2013).

USO	18/1	14/2	14/3	17/4	01/5	13/JUN	31/JUL	02/AGO	26/SET	10/OUT	26/NOV	04/DEZ	MÉD
AGRICULTURA	50,1	41,0	81,2	34,5	65,2	71,2	112,8	99,4	126,2	178,3	69,5	66,0	83,0
AGRICULTURA IRRIGADA	60,6	40,4	80,0	43,8	79,8	94,8	84,3	85,8	122,0	152,8	61,3	99,0	83,7
ÁGUA	268,3	253,6	263,2	262,3	336,6	336,3	263,4	239,6	344,6	353,9	359,6	364,0	303,8
ÁREA URBANA	168,3	134,8	122,6	142,0	179,4	161,0	153,2	143,2	207,6	202,2	197,0	258,2	172,5
CERRADO	112,1	110,8	107,0	90,6	126,7	123,0	124,8	117,3	180,4	158,8	157,3	155,0	130,3
FLORESTA	86,4	66,2	105,0	64,0	96,8	92,8	101,2	88,8	167,0	114,0	109,0	98,0	99,1
PASTAGEM	118,5	119,9	99,6	90,8	137,4	119,8	148,1	128,1	183,4	177,2	171,8	172,7	138,9
SILVICULTURA	57,4	57,6	43,0	27,6	60,8	56,6	54,8	54,2	79,0	72,8	53,0	108,6	60,5
SOLO DESCOBERTO	135,0	164,6	137,0	132,6	178,4	161,2	155,3	150,7	221,6	208,4	195,7	196,8	169,8

Fonte: Imagem MYD09GA – MODIS/AQUA, 2013.

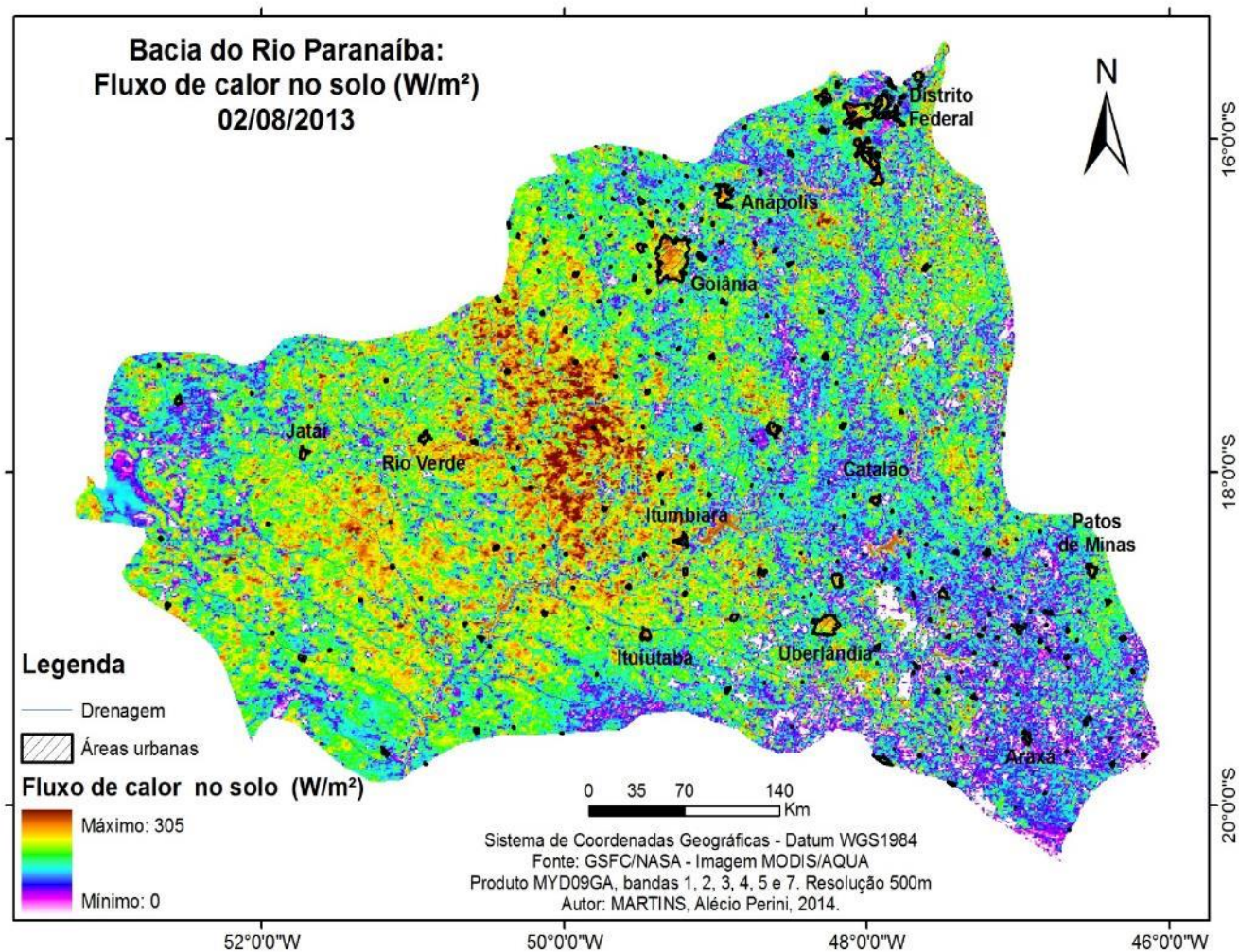
**Mapa 26.** Distribuição espacial do fluxo de calor no solo ( $\text{W/m}^2$ ) na bacia do Rio Paranaíba



Fonte: Imagem MODIS/AQUA de 31 de julho de 2013.  
Autor: MARTINS, Alécio Perini, 2015.



**Mapa 27.** Distribuição espacial do fluxo de calor no solo ( $\text{W/m}^2$ ) na bacia do Rio Paranaíba



Fonte: Imagem MODIS/AQUA de 02 de agosto de 2013.  
Autor: MARTINS, Alécio Perini, 2015.

Analisando os mapas de fluxo de calor no solo para os dias 31/07 e 02/08, percebe-se uma tendência de variação espacial dessa variável em função das categorias de uso da terra, DO saldo de radiação em superfície e das altitudes, sendo os menores valores registrados em áreas com altitudes acima de 900 m ou que se encontrem recobertas por formações vegetais naturais, como florestas e feições de cerrado mais densas, assim como áreas agrícolas e ocupadas por plantios florestais. Destacam-se ainda os baixos valores de fluxo de calor no solo registrados nas porções sudeste e nordeste da bacia do Rio Paranaíba, onde concentram-se a maioria das áreas de agricultura irrigada e plantios florestais, sendo a presença de água no solo um fator que exerce influências sobre o albedo, NDVI e saldo de radiação e, portanto, sobre os fluxos de calor. Com exceção das áreas de solo descoberto, as demais categorias de uso da terra e cobertura vegetal apresentaram coeficiente de correlação de 0,9 entre os valores de fluxo de calor no solo e saldo de radiação à superfície, sendo esse índice de 0,75 considerando áreas de solo descoberto.

Os valores médios e medianas concentram-se na faixa entre 100 e 140 W/m<sup>2</sup>, principalmente sobre áreas de cerrado aberto, pastagem e agricultura, que compõem a maior parte da bacia. Conforme a tabela 8, os maiores valores são identificados nos meses de setembro e outubro, que correspondem ao final do período seco na região, além de apresentar temperaturas elevadas e baixos valores de umidade relativa do ar

Os mapas 28 e 29 abordam especificamente a variação espacial do fluxo de calor sensível, variável mais complicada de ser estimada pelo SEBAL. As principais dificuldades encontram-se na falta de dados mais completos de velocidade dos ventos e de rugosidade da superfície, que comprometem o cálculo da variável “*Rah*”, que corresponde à resistência aerodinâmica da superfície. Essa variável é importante porque o vento é responsável pelo processo de transporte de umidade, o que pode fazer com que os valores de evapotranspiração diária fiquem subestimados ou superestimados.

A tabela 9 permite analisar os dados obtidos pixel a pixel para 12 imagens selecionadas para o estudo. É possível identificar que os maiores valores correspondem a áreas de solo descoberto, centros urbanos e pastagens, evidenciando que a pouca ou ausente cobertura vegetal é fator determinante na regulação destes fluxos, visto que os menores valores foram encontrados em áreas de silvicultura, florestas e agricultura, que apresentam maior densidade vegetal. Os menores valores foram encontrados sobre corpos hídricos, chegando próximos a 10 W/m<sup>2</sup>, de forma inversa ao que foi identificado na estimativa do fluxo de calor no solo. Observa-se que fluxo de calor sensível e temperatura de superfície são diretamente proporcionais, apresentando

coeficiente de correlação de 0,98 evidenciando que, quanto maior a temperatura de superfície, maiores os valores de fluxo de calor sensível registrados.

As maiores médias de fluxo de calor sensível foram identificadas nas imagens dos dias 26 de setembro e 10 de outubro, que apresentam-se como o auge do período seco na região, com redução brusca nos meses de novembro e dezembro, com o início da estação chuvosa.

**Tabela 9.** Valores médios do fluxo de calor sensível ( $\text{W/m}^2$ ) por categoria de uso da terra e cobertura vegetal obtidos por tabulação cruzada para a Bacia do Rio Paranaíba (2013).

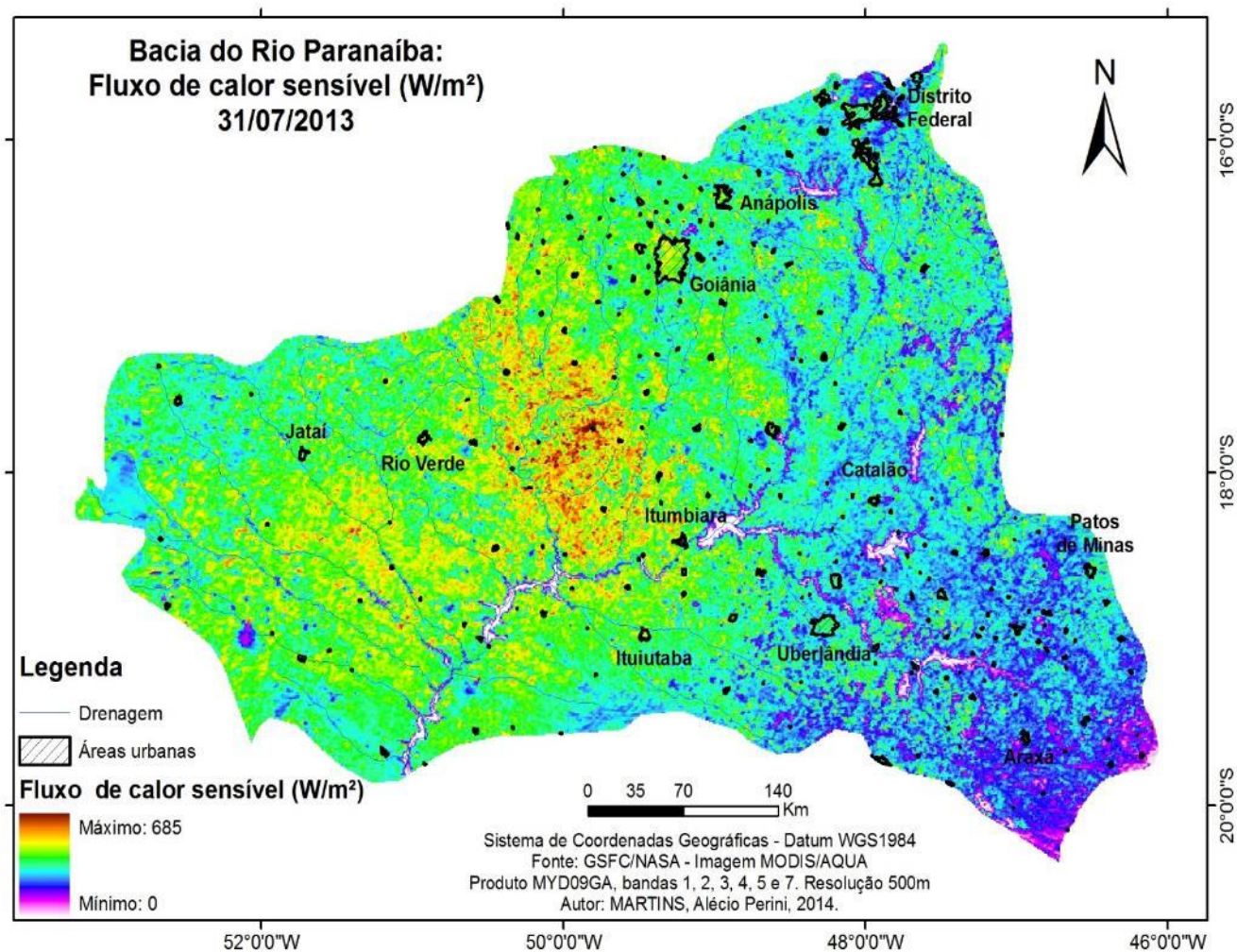
USO	18/1	14/2	14/3	17/4	01/5	13/6	31/7	02/8	26/9	10/10	26/11	04/12	MÉD
AGRICULTURA	240,1	232,6	320,3	90,4	208,4	182,2	313,8	231,1	350,0	631,3	62,0	129,1	249,3
AGRICULTURA IRRIGADA	296,9	251,8	322,4	138,2	203,2	217,2	254,6	260,7	406,4	528,0	82,6	140,3	258,5
ÁGUA	115,0	116,6	162,0	99,8	92,6	89,8	17,0	18,1	22,2	288,7	59,0	72,9	96,1
ÁREA URBANA	411,1	349,4	348,0	379,0	451,7	458,4	390,6	349,9	478,0	696,8	330,8	259,3	408,6
CERRADO	258,5	296,5	253,5	199,5	265,6	294,4	243,7	235,3	395,6	588,3	162,0	175,5	280,7
FLORESTA	224,2	267,5	218,6	167,8	263,7	275,4	206,2	187,0	317,2	518,0	97,3	118,0	238,4
PASTAGEM	264,2	327,5	336,6	215,9	355,8	375,4	337,4	300,8	402,4	706,6	281,5	268,5	347,7
SILVICULTURA	115,4	203,5	180,3	46,6	101,2	67,2	104,8	107,9	242,6	436,3	98,4	115,0	151,6
SOLO DESCOBERTO	308,2	367,8	400,4	359,3	505,4	512,0	553,8	412,6	540,7	681,4	380,0	271,0	441,1

Fonte: Imagem MYD09GA – MODIS/AQUA, 2013.

A estimativa dos fluxos de calor sensível é importante para a obtenção de valores de evapotranspiração real mais exatos, sendo necessária atenção especial com dados de velocidade dos ventos, bem como a rugosidade do terreno, pois o vento é o principal elemento climático que determina essa variável.

Os valores médios de fluxo de calor sensível variam próximos a  $300 \text{ W/m}^2$  e ocorrem principalmente sobre áreas de pastagem, cerrado aberto e agricultura, apresentando valores coerentes com outros estudos utilizados como base, como o de Nicácio (2008), que apresentou valores médios de 350 a  $380 \text{ W/m}^2$  para áreas de savana aberta na região de Petrolina/PE para os meses de outubro e novembro de 2004. Ferreira e Meirelles (2011) evidenciaram valores médios de  $672 \text{ W/m}^2$  para o Sul Goiano em 6 de março de 2010, valor que parece estar superestimado em comparação aos cálculos realizados para as 12 imagens deste estudo.

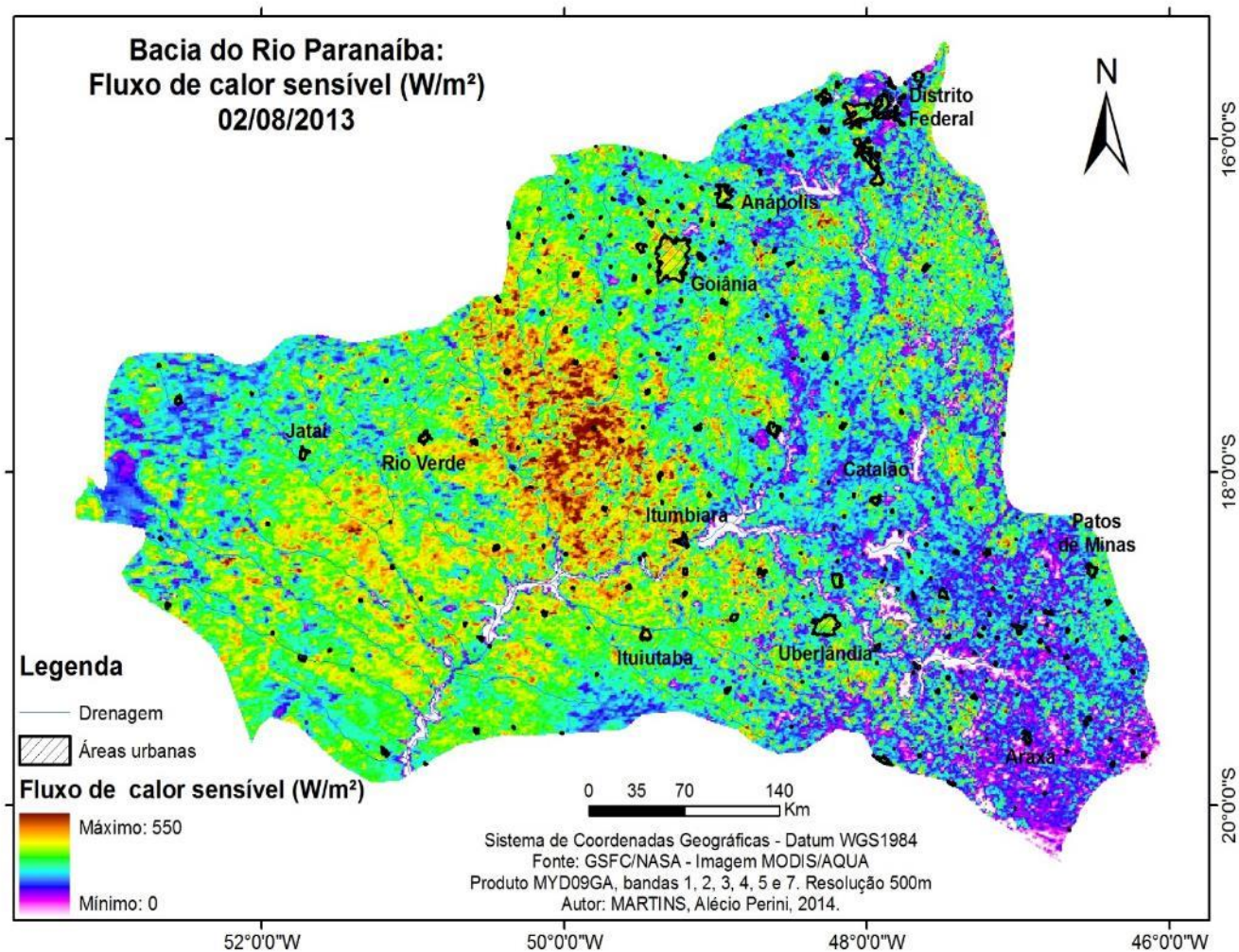
**Mapa 28.** Distribuição espacial do fluxo de calor sensível ( $\text{W/m}^2$ ) na bacia do Rio Paranaíba



Fonte: Imagem MODIS/AQUA de 31 de julho de 2013.  
Autor: MARTINS, Alécio Perini, 2015.



**Mapa 29.** Distribuição espacial do fluxo de calor sensível ( $\text{W/m}^2$ ) na bacia do Rio Paranaíba



Fonte: Imagem MODIS/AQUA de 02 de agosto de 2013.  
Autor: MARTINS, Alécio Perini, 2015.

É interessante observar os valores de fluxo de calor sensível registrados próximos às estações de Brasília e Roncador, no Distrito Federal, localizadas relativamente próximas e em altitudes parecidas. Apesar de apresentarem temperaturas médias e valores de evaporação parecidos, os valores de fluxo de calor sensível, evapotranspiração horária e evapotranspiração diária são completamente diferentes. Uma das causas está na velocidade dos ventos registrada em ambas as estações, levando à conclusão de que, quanto maior a velocidade do vento, menor o fluxo de calor sensível e maiores os valores de evapotranspiração. Outro aspecto interessante, é que a estação Roncador encontra-se em área de cerrado relativamente conservada, enquanto a estação de Brasília encontra-se em pixel com características de solo urbano

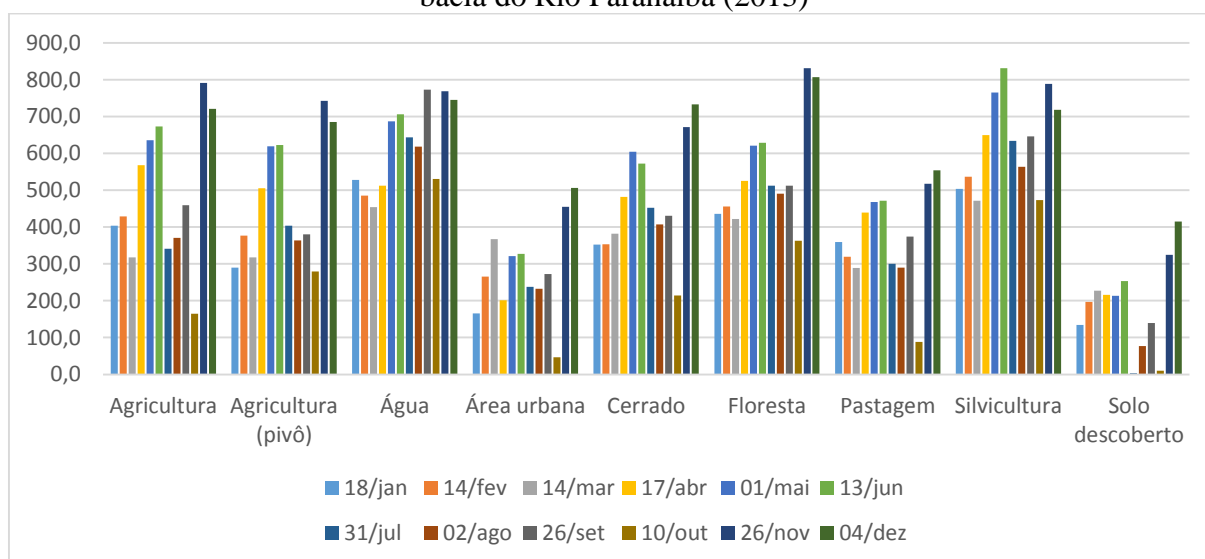
Assim, ressalta-se a necessidade de utilizar dados mais completos e, se possível, horários de velocidade dos ventos e temperatura de superfície e do ar (aferida em condições de abrigo) para estimar valores mais exatos de  $R_{ah}$  e de diferença de temperatura e, assim, obter índices de fluxo de calor sensível mais exatos. Fica evidente, também, a importância da vegetação arbórea como “barreiras verdes” ou como “quebra-ventos” para evitar a perda de água por evapotranspiração, essencial para áreas irrigadas.

Os valores do fluxo de calor no solo e do fluxo de calor sensível, se subtraídos dos valores do saldo de radiação à superfície, fornecem os dados de fluxo de calor latente (mapas 30 e 31, tabela 10), variável importante por ser a grandeza física que impulsiona o processo de evapotranspiração, sendo fundamental para a estimativa da transferência de água em estado de vapor no sistema solo/planta/atmosfera.

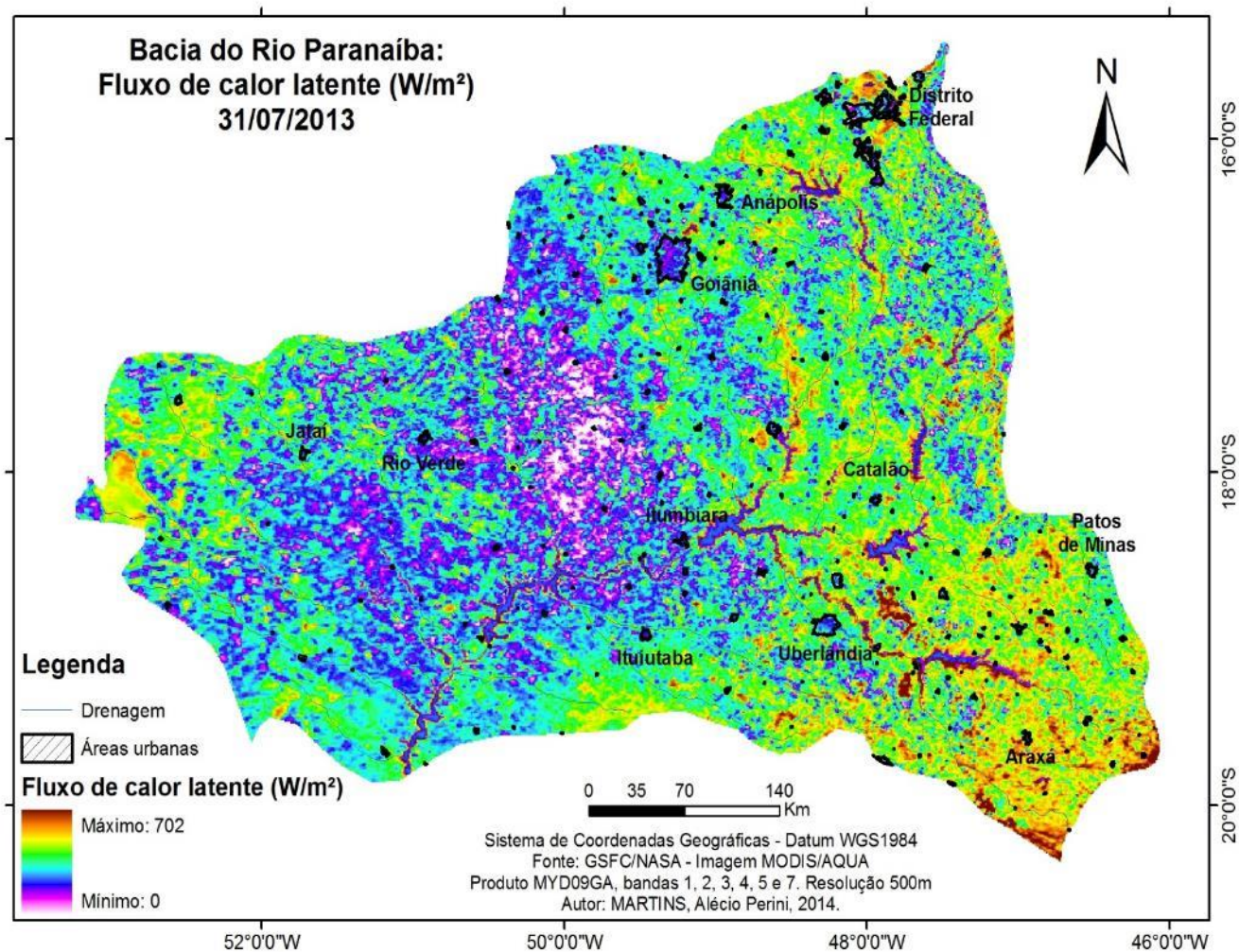
**Tabela 10.** Valores médios do fluxo de calor latente ( $W/m^2$ ) por categoria de uso da terra e cobertura vegetal obtidos por tabulação cruzada para a Bacia do Rio Paranaíba (2013).

USO	18/1	14/2	14/3	17/4	01/5	13/6	31/7	02/8	26/9	10/10	26/11	04/12	MÉD
AGRICULTURA	403,4	428,8	317,2	567,9	635,6	673,0	341,2	370,6	458,8	164,4	791,0	720,9	489,4
AGRICULTURA IRRIGADA	289,7	376,9	317,8	505,2	619,4	622,4	404,0	363,6	380,4	279,5	742,7	684,7	465,5
ÁGUA	528,2	484,9	454,2	512,1	687,0	705,5	643,7	618,3	772,4	530,7	768,4	745,1	620,9
ÁREA URBANA	165,6	265,8	366,9	201,6	321,2	327,2	237,5	232,1	272,2	46,2	455,0	506,5	283,2
CERRADO	352,6	353,3	382,3	482,1	604,3	572,2	451,9	406,7	430,2	214,1	671,0	732,5	471,1
FLORESTA	436,0	456,1	421,9	525,0	620,8	628,6	512,1	490,8	512,2	363,0	831,0	806,5	550,3
PASTAGEM	359,3	319,4	288,5	439,6	467,5	471,8	299,8	290,2	373,8	88,6	517,2	553,6	372,4
SILVICULTURA	503,2	536,5	471,7	649,8	764,9	831,2	633,8	563,7	645,6	472,9	788,2	717,9	631,6
SOLO DESCOBERTO	134,6	197,0	227,2	215,9	213,4	253,2	3,3	76,9	139,3	9,8	324,4	415,2	184,2

Fonte: Imagem MYD09GA – MODIS/AQUA, 2013.



**Mapa 30.** Distribuição espacial do fluxo de calor latente ( $\text{W/m}^2$ ) na bacia do Rio Paranaíba

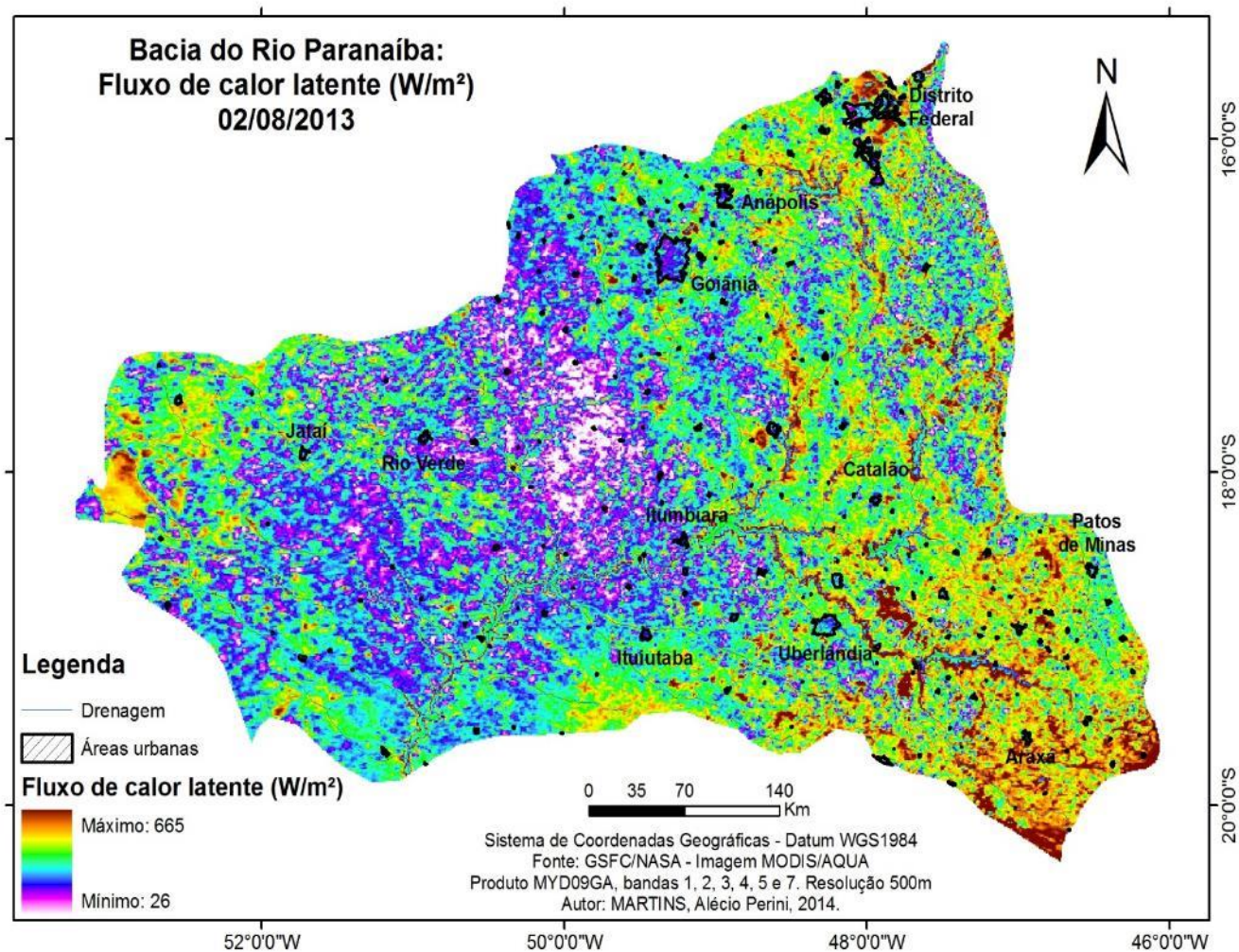


Fonte: Imagem MODIS/AQUA de 31 de julho de 2013.

Autor: MARTINS, Alécio Perini, 2015.



**Mapa 31.** Distribuição espacial do fluxo de calor latente ( $\text{W/m}^2$ ) na bacia do Rio Paranaíba



Fonte: Imagem MODIS/AQUA de 02 de agosto de 2013.  
Autor: MARTINS, Alécio Perini, 2015.

Para calcular a evapotranspiração instantânea, considerou-se o fluxo de calor latente e o calor latente de evaporação ( $\lambda$ ) que, multiplicados por 3600, fornecem a fração de água evaporada em 1 hora em cada pixel. Conforme mencionado, esses valores dependem do cálculo de fluxo de calor sensível e, portanto, podem estar superestimados ou subestimados, dependendo da confiabilidade dos dados de velocidade dos ventos utilizados. Ressalta-se, ainda, que esses dados foram calculados para as 14:30h, horário aproximado de passagem do satélite pela região.

Nos mapas 32 e 33, observa-se que os polígonos seguem o mesmo padrão apresentado no mapa de fluxo de calor latente, sendo os menores valores apresentados pelas áreas com solo descoberto e pastagem degradada. A média de evapotranspiração instantânea foi de 0,69 mm/h para o dia 31/07 e de 0,46 mm/h para o dia 02/08, considerando que a maior parte da área de estudo encontra-se coberta por pastagens, áreas de solo agrícola descoberto e formações savânicas abertas. Em ambos os mapas, os maiores valores de ETh foram registrados sobre áreas de espelhos d'água, silvicultura e vegetação florestal densa, chegando a índices próximos a 0,9 mm/h.

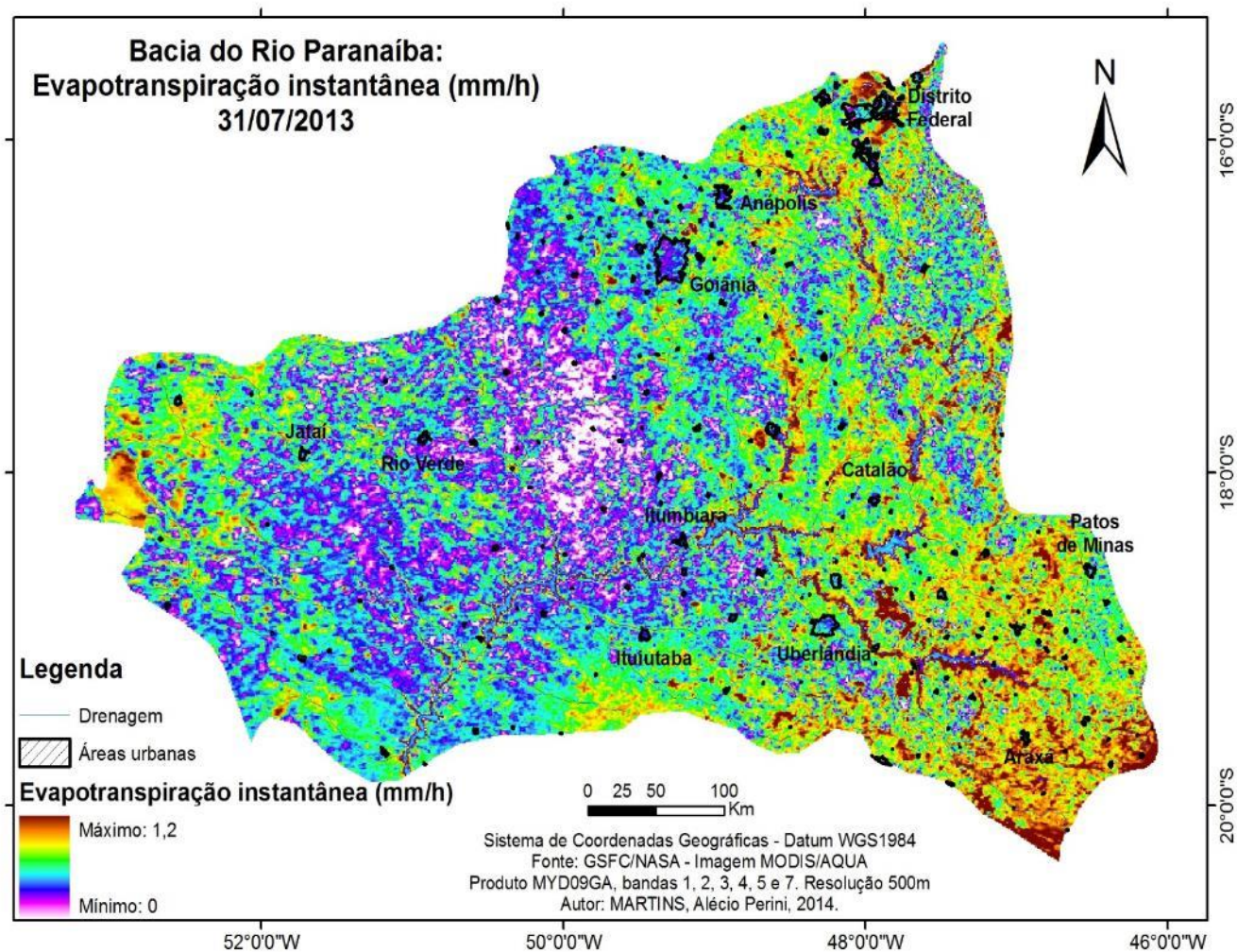
De acordo com a tabela 11, que expõe a variação sazonal da evapotranspiração instantânea, os maiores valores foram registrados nos meses de novembro e dezembro, relacionado principalmente ao volume de chuvas registrado e aos baixos valores de fluxo de calor sensível, que aumentou proporcionalmente o fluxo de calor latente. Os menores valores foram registrados no mês de outubro, final do período de estiagem na região, que apresenta baixas quantidades de água no solo e nas plantas.

**Tabela 11.** Valores médios de evapotranspiração instantânea (mm/h) por categoria de uso da terra e cobertura vegetal obtidos por tabulação cruzada para a Bacia do Rio Paranaíba (2013).

USO	18/1	14/2	14/3	17/4	01/5	13/6	31/7	02/8	26/9	10/10	26/11	04/12	MÉD
AGRICULTURA	0,59	0,67	0,48	0,86	0,96	0,91	0,47	0,45	0,79	0,28	1,17	1,08	0,73
AGRICULTURA IRRIGADA	0,54	0,71	0,48	0,74	0,89	0,86	0,59	0,59	0,63	0,31	0,94	0,99	0,69
ÁGUA	0,74	0,74	0,59	0,89	1,00	0,97	0,73	0,83	1,15	0,78	1,13	1,14	0,89
ÁREA URBANA	0,27	0,21	0,33	0,26	0,47	0,44	0,37	0,33	0,39	0,06	0,64	0,71	0,37
CERRADO	0,49	0,50	0,43	0,70	0,85	0,75	0,67	0,60	0,59	0,28	0,89	1,12	0,66
FLORESTA	0,73	0,86	0,57	0,83	0,98	0,95	0,69	0,70	0,79	0,50	1,21	1,21	0,84
PASTAGEM	0,51	0,51	0,42	0,62	0,69	0,64	0,47	0,37	0,54	0,13	0,76	0,76	0,54
SILVICULTURA	0,65	0,82	0,71	0,97	1,15	1,16	0,93	0,82	0,96	0,64	1,15	1,03	0,92
SOLO DESCOBERTO	0,26	0,23	0,26	0,28	0,32	0,30	0,25	0,20	0,24	0,01	0,53	0,62	0,29

Fonte: Imagem MYD09GA – MODIS/AQUA, 2013.

**Mapa 32.** Distribuição espacial da evapotranspiração real instantânea (mm/h) na bacia do Rio Paranaíba

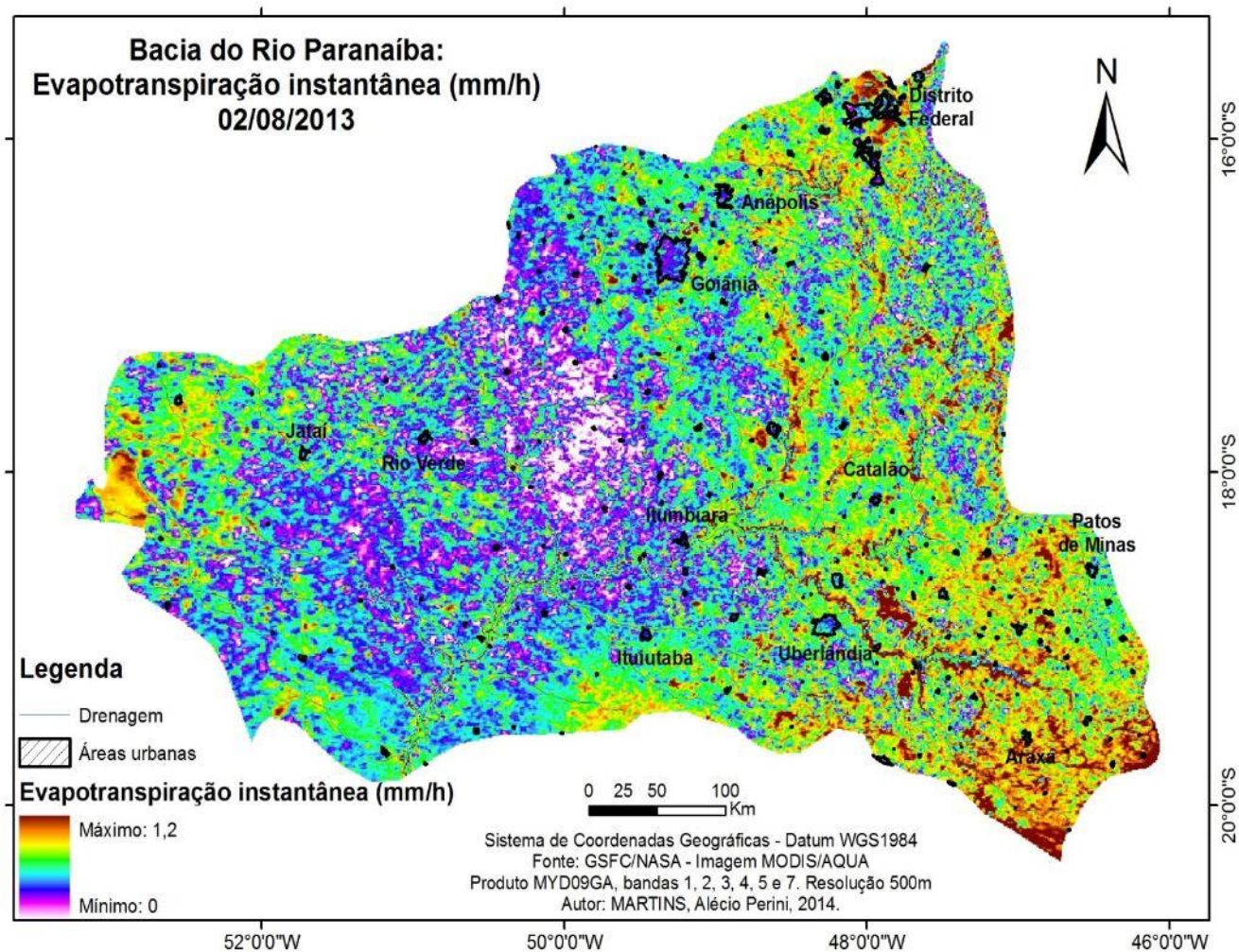


Fonte: Imagem MODIS/AQUA de 31 de julho de 2013.

Autor: MARTINS, Alécio Perini, 2015.



**Mapa 33.** Distribuição espacial da evapotranspiração real instantânea (mm/h) na bacia do Rio Paranaíba



Fonte: Imagem MODIS/AQUA de 02 de agosto de 2013.

Autor: MARTINS, Alécio Perini, 2015.



Analisando os mapas 32 e 33, percebe-se que não existe diferença visual entre as estimativas dos dias 31 de julho e 02 de agosto, visto que o período é curto para mudanças nos padrões de evapotranspiração, sendo as diferenças mais significativas observadas ao comparar as médias registradas nos meses de verão (de novembro a abril) e nos meses de inverno (de maio a outubro).

Em mapeamento elaborado para imagens dos meses de outubro e novembro de 2004 para a região de Petrolina/PE, Nicácio (2008) aponta valores médios de ETh próximos a 0,6 mm/h, embora trate de um período pós-chuvas no semi-árido e inclua áreas irrigadas. Bezerra, Silva e Ferreira (2008), ao estimar a evapotranspiração real para a região de Juazeiro/CE com o SEBAL indicaram erro inferior a 10% após validação entre os dados estimados e aqueles medidos pela técnica da razão de Bowen, indicando valores médios de 0,64 mm/h considerando áreas de plantio em diferentes períodos do ano. Esses valores assemelham-se aos estimados para as áreas agrícolas da bacia do Rio Paranaíba, estando um pouco abaixo considerando-se as características climáticas de ambas as áreas de estudo.

Com os dados de evapotranspiração instantânea, juntamente com informações referentes à fração evaporativa no instante da passagem do satélite e a evapotranspiração de referência calculada de acordo com metodologia da FAO a partir dos dados climáticos registrados nas estações convencionais do INMET, foi realizada uma estimativa da evapotranspiração potencial diária (mm/dia), informação importante, por exemplo, para o planejamento de aplicação de irrigação em lavouras. A variação espacial dessas informações pode ser melhor observada nos mapas 34 e 35.

O mapeamento de evapotranspiração diária, conforme tabela 12, apresentou valores médios de 3,4 mm/dia para o ano de 2013, sendo esses valores observados predominantemente em áreas de pastagens e cerrado aberto. Solos de agricultura descobertos e pastagens degradadas apresentaram valores inferiores a 2 mm/dia, chegando a índices próximos a 0 mm/dia em áreas de solo arenoso exposto.

Os maiores valores, assim como acontece com a evapotranspiração instantânea, foram registrados sobre os espelhos d'água, que chegaram a apresentar índices superiores a 10 mm/dia e sobre as áreas de floresta estacional e de silvicultura, com índices de até 8 mm/dia. Regiões cobertas por lavouras apresentaram evapotranspiração diária média de 13 mm/dia, chegando a valores de 4,4 mm/dia. Considerando as imagens utilizadas na calibração dos modelos, foram registrados valores médios superiores a 5mm/dia para corpos hídricos e plantios florestais,

enquanto que áreas de mata ciliar e residuais de florestas apresentaram médias entre 4 e 5mm. Áreas de cerrado e pastagens apresentaram índices muito semelhantes em todos os meses.

**Tabela 12.** Valores médios de evapotranspiração real diária (mm/dia) por categoria de uso da terra e cobertura vegetal obtidos por tabulação cruzada para a Bacia do Rio Paranaíba (2013).

USO	18/1	14/2	14/3	17/4	01/5	13/6	31/7	02/8	26/9	10/10	26/11	04/12	MÉD
ÁGUA	5,27	5,82	4,52	5,89	5,15	4,57	5,67	5,08	7,95	5,91	7,56	6,51	5,83
FLORESTA	4,25	5,98	4,51	4,80	4,65	4,61	4,80	4,43	4,74	3,89	7,95	7,22	5,15
SILVICULTURA	4,25	5,63	4,56	5,97	5,25	4,73	5,76	5,05	6,25	4,86	7,65	6,09	5,50
AGRICULTURA	4,27	4,97	3,18	5,09	4,43	3,71	3,42	2,83	4,92	2,15	7,83	6,45	4,44
AGRICULTURA IRRIGADA	3,80	5,11	3,18	4,60	4,25	3,12	4,27	3,70	4,27	2,40	6,90	5,29	4,24
CERRADO	3,58	3,72	2,93	4,10	4,04	2,74	4,22	3,71	4,25	2,12	5,96	5,31	3,89
PASTAGEM	3,53	3,79	2,86	4,03	3,07	2,32	3,06	2,64	3,98	0,98	5,19	5,08	3,38
ÁREA URBANA	2,51	1,45	1,86	1,90	2,38	1,57	2,68	2,26	2,92	0,35	4,83	4,35	2,42
SOLO DESCOBERTO	2,37	1,89	1,07	2,02	2,16	0,91	1,65	0,95	1,03	0,08	3,75	3,85	1,81
MÉDIA GERAL	3,34	3,5	2,51	3,62	3,39	2,40	3,52	2,82	3,56	1,35	5,74	5,06	3,40

Fonte: Imagem MYD09GA – MODIS/AQUA, 2013.

No estudo de Nicácio (2008), utilizado como base de comparação, os valores médios de evapotranspiração diária para os meses de outubro e novembro ficaram próximos a 8,5 mm/dia, valores superiores aos encontrados nas estimativas realizadas para a bacia do Rio Paranaíba, mas que não apresentam-se tão significativos já que a área de estudo de Nicácio (2008) apresenta áreas de fruticultura irrigada.

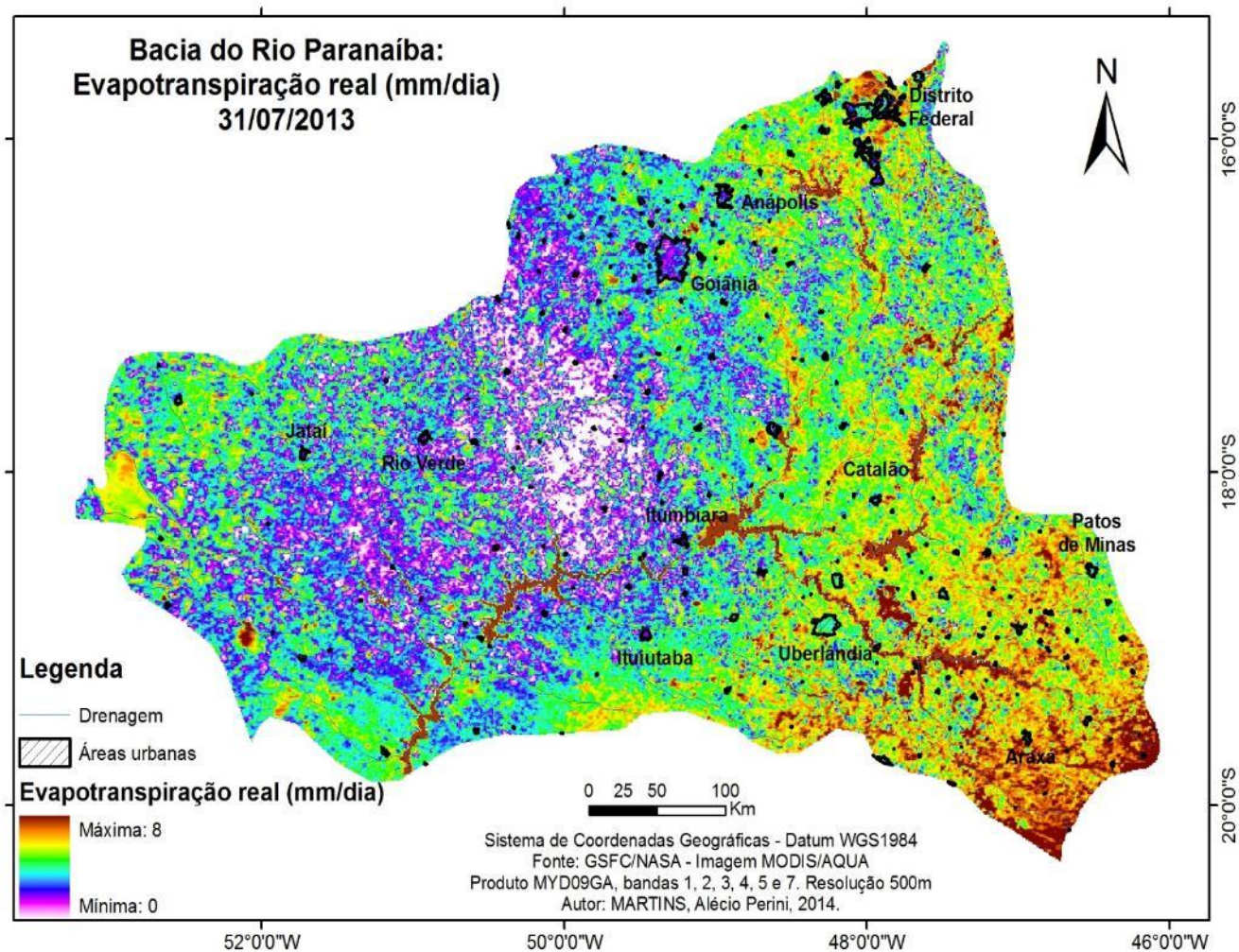
Filgueira, Ribeiro e Rodrigues (2013), ao estimarem valores de evapotranspiração para a região Norte de Minas no dia 15 de setembro de 2010, encontraram valores médios de 2,51 mm/dia, com mínima de 0 mm/dia e máxima de 7,04 mm/dia. Considerando se tratar de uma região de transição para o semiárido, os resultados obtidos no estudo desenvolvido para a bacia do Rio Paranaíba estão coerentes, evidenciando a eficácia do modelo.

Lima et al (2012) estimaram valores médios de 3,17mm/dia para o dia 23 de setembro em estudo de estimativa de evapotranspiração real na bacia do Rio Paracatu (MG) utilizando imagens do sensor MODIS/TERRA.

Ferreira e Meirelles (2011), ao estimarem valores de evapotranspiração real para o Sul do Estado de Goiás para o dia 06 de março de 2010, encontrando uma média de 1,57 mm/dia, bem abaixo do calculado neste estudo, que foi de 2,51 mm/dia para 14 de março de 2013.

Bezerra, Silva e Ferreira (2008) encontraram valores médios de 5,1 mm/dia para áreas agrícolas da região de Juazeiro do Norte/CE considerando imagens de diferentes períodos do ano, valores que também apresentam coerência com os encontrados na bacia do Rio Paranaíba, considerando as características climáticas de cada região. Segundo os autores, o erro médio fica na casa de 7% se comparados aos valores medidos pela técnica da razão de Bowen.

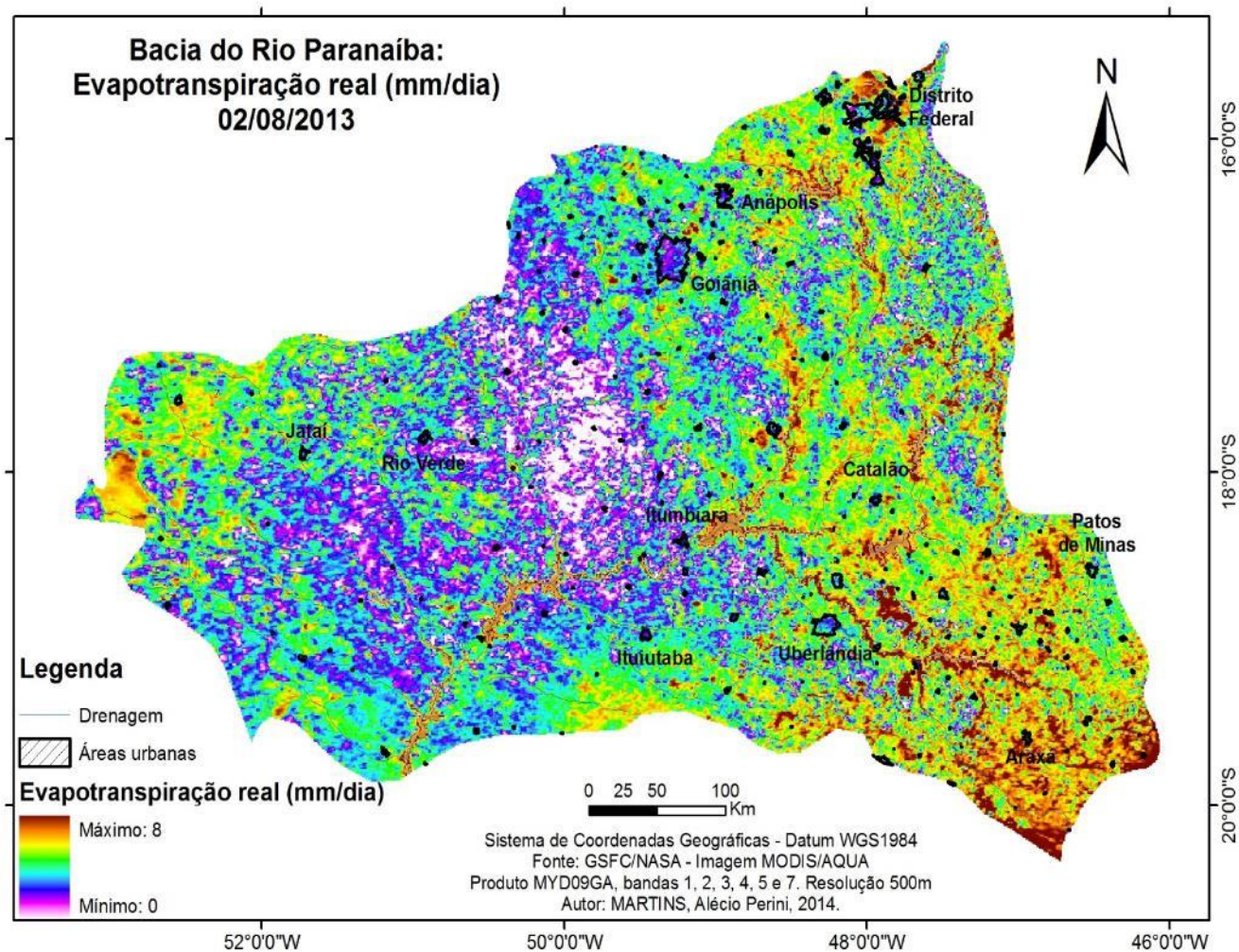
**Mapa 34.** Distribuição espacial da evapotranspiração real diária (mm/dia) na bacia do Rio Paranaíba



Fonte: Imagem MODIS/AQUA de 31 de julho de 2013.

Autor: MARTINS, Alécio Perini, 2015.

**Mapa 35.** Distribuição espacial da evapotranspiração real diária (mm/dia) na bacia do Rio Paranaíba



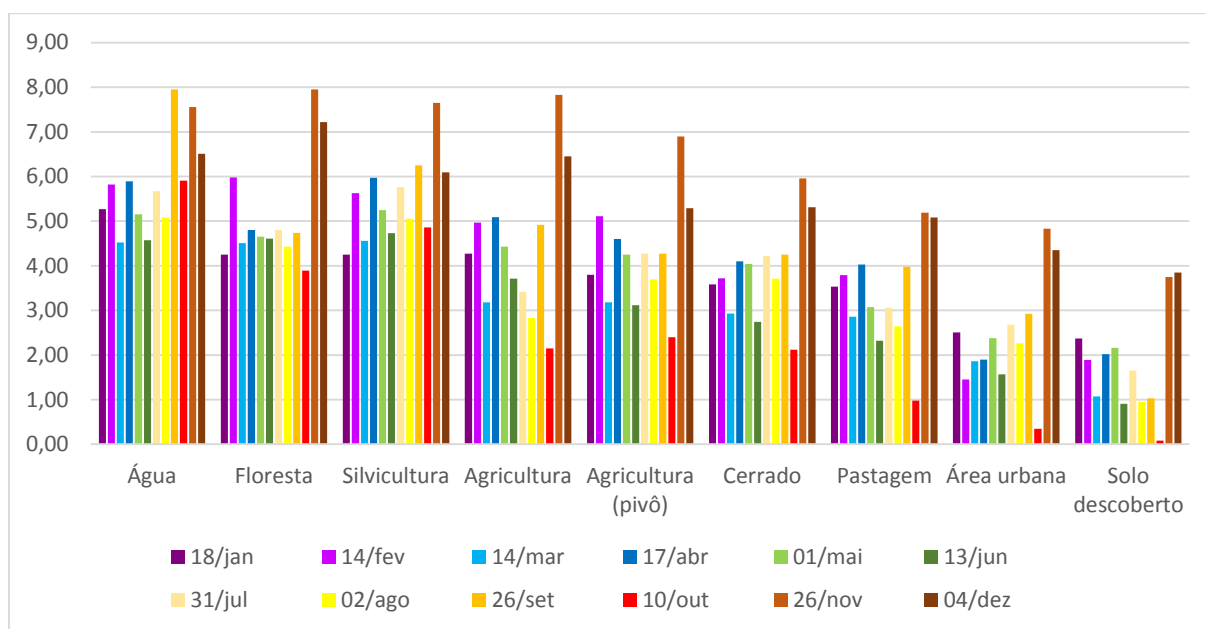
Fonte: Imagem MODIS/AQUA de 02 de agosto de 2013.  
Autor: MARTINS, Alécio Perini, 2015.



As áreas representadas por solos descobertos chegaram a apresentar valores próximos a 0 em outubro de 2013, auge do período seco, enquanto que, nessa mesma data, áreas cobertas por vegetação apresentaram índices superiores a 2mm/dia, chegando a 3,89 mm/dia em áreas com vegetação densa, evidenciando a importância dessas áreas para o ciclo hidrológico.

O gráfico 3 fornece uma noção geral sobre o comportamento sazonal da evapotranspiração real (mm/dia) de acordo com cada categoria de uso da terra e cobertura vegetal. O que chama mais a atenção na figura é a diferença abrupta demonstrada entre as informações estimadas para 10 de outubro e 26 de novembro, marcando o início das chuvas na região e a reposição de água no solo.

**Gráfico 3.** Variação sazonal da evapotranspiração real média (mm/dia) estimada para diferentes usos das terras na bacia do Rio Paranaíba (2013)



Outra análise que pode ser feita é que os valores médios de ETr obtidos em superfície são, em média, 34% inferiores aos valores de referência calculados a partir dos registros climatológicos das estações convencionais do INMET pela metodologia da FAO (tabela 13). Esses valores de referência são calculados para áreas homogêneas, gramadas e com mínima interferência externa, correspondendo à evapotranspiração potencial dos cálculos e mapeamentos do balanço hídrico apresentados na seção 4. Considerando as médias de ETP calculadas pela metodologia de Thorntwaite e Matter (1955), observa-se que o comportamento dos valores segue a mesma tendência, visto que, por esta metodologia, os valores médios de ETP anual apresentam-se 21% superiores aos valores de ETr.

**Tabela 13.** Comparativo entre os valores médios de evapotranspiração real estimados via SEBAL (mm/dia) e os dados de evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) calculados de acordo com a metodologia da FAO a partir de dados climatológicos.

DATA	ETR SEBAL (MM/DIA)	ETO FAO (MM/DIA)
18/01	3,3	5,7
14/02	3,5	5,7
14/03	2,5	5,3
17/04	3,6	4,4
01/05	3,4	4,3
13/06	2,4	3,5
31/07	3,5	4,9
02/08	2,8	4,0
26/09	3,6	6,0
10/10	1,3	6,7
26/11	5,7	6,0
04/12	5,1	5,4
MÉDIA	3,4	5,2

**Fonte:** Imagem MYD09GA – MODIS/AQUA, 2013; BDMEP/INMET, 2014; FAO, 2014.

Ao compararmos os dados obtidos em superfície nos pixels onde estão localizadas as estações convencionais do INMET com as informações registradas pelos evaporímetros de pichê, percebe-se que, na maioria das estações, os valores de superfície são inferiores aos registrados em abrigo, já que encontram-se sobre influência direta de fatores externos. Em estações localizadas em áreas urbanas mais adensadas, como Brasília e Goiânia, observa-se que o valor registrado no pixel é inferior ao registrado em cidades de médio/pequeno porte, justamente pela interferência de outros componentes do pixel como áreas construídas, sombra, entre outros, uma vez que, quanto maior o albedo, menor a evapotranspiração.

Outras estações, como as de Jataí, Paranaíba e Patos de Minas, a evapotranspiração registrada em superfície é semelhante à evaporação registrada em abrigo, visto que o entorno é ocupado por atividades agropecuárias, que apresentam maiores valores de evapotranspiração do que áreas construídas ou em abrigos. Merece destaque o valor elevado de evapotranspiração em superfície registrado no pixel da estação Roncador, no Distrito Federal, que encontra-se cercado por áreas de cerrado conservadas

Os dados de evaporação registrados nas estações convencionais do INMET e as estimativas de evapotranspiração real de superfície por sensoriamento remoto não apresentaram

correlação, visto que as estimativas consideram, além da evaporação, a transpiração de plantas e animais, aliados à ação dos ventos e outros fatores externos. A única correlação encontrada, nesse caso, foi com as categorias de uso da terra e cobertura vegetal, o que comprova a hipótese da pesquisa.

Chamam bastante atenção os dados estimados para superfícies cobertas por cultivo de eucalipto, que apresentam média de evapotranspiração semelhante às médias registradas em corpos hídricos, o que decorre, principalmente, do rápido crescimento fenológico da cultura, o que sugere que o consumo de água seja superior ao consumo de áreas de cultivo de grãos, cana-de-açúcar, café, entre outros e maior do que áreas de vegetação nativa. Se, por um lado, o cultivo florestal contribui com o fornecimento de água em formato de vapor para a atmosfera, por outro, sugere-se que esses cultivos estejam consumindo grandes quantidades de água presente no solo, reduzindo a oferta deste recurso.

Frente aos dados apresentados, considera-se que seja possível obter bons resultados de estimativa de evapotranspiração para áreas extensas, com pixels de 500 metros ou superiores, mas que para áreas menores ou com imagens de média/alta resolução espacial seriam necessárias análises mais pontuais, com medições de campo e dados horários de temperatura e velocidade dos ventos para uma calibração mais eficiente do modelo. Embora as informações aqui estimadas e mapeadas a partir de princípios matemáticos sejam importantes ferramentas de caracterização, análise e gestão ambiental para grandes bacias, ainda precisam ser aprofundadas, por exemplo, para auxiliar no planejamento e implementação de projetos de irrigação em áreas específicas do domínio tropical.

Sugere-se, ainda, que adaptações sejam feitas ao modelo para reduzir as margens de erro do processamento, como por exemplo considerar as características dos solos para estimativas dos fluxos calor e evapotranspiração. É preciso estabelecer um índice eficaz para o coeficiente de rugosidade do terreno, baseado nas categorias de uso da terra e altura da vegetação nesses diferentes usos, pois os dados das estações climatológicas restringem esses valores para áreas gramadas. Deve-se investir na instalação de equipamentos e coleta de dados com maior periodicidade e precisão de velocidade dos ventos e evaporação, visto que a maioria das medições de campo se restringem à temperatura instantânea, máxima e mínima, precipitação e, em alguns casos, da umidade relativa do ar.

Fica evidente a necessidade de que essas informações sejam discutidas para subsidiar um planejamento regional integrado de estruturação de atividades produtivas e planejamento



do uso da terra e delimitação de áreas de conservação, minimizando os efeitos dessas atividades sobre a temperatura da superfície e sobre o ciclo hidrológico, pois disso depende a garantia de água em quantidade e qualidade suficientes para suprir as necessidades das populações no campo e nas cidades, assim como a manutenção de atividades industriais, de produção de alimentos e commodities, mineração e produção de energia.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Proposta com o intuito de realizar uma estimativa da evapotranspiração real de superfície por meio de imagens de sensoriamento remoto e ferramentas de geoprocessamento, considera-se que a pesquisa atingiu seus objetivos, tanto gerais quanto específicos, com êxito. Pretendia-se comprovar a hipótese de que elementos como albedo, índice de vegetação, temperatura de superfície, saldo de radiação, fluxos de calor e evapotranspiração real encontram-se intrinsecamente relacionados às categorias de uso da terra e cobertura vegetal, ponto em que também foi obtido êxito.

Comprovou-se que, além das categorias de uso da terra e cobertura vegetal, a ocorrência e distribuição espacial de precipitações, bem como da umidade relativa do ar são elementos fundamentais para compreender essa dinâmica, que mostra padrões diferentes entre os meses de verão e inverno. Também foi comprovado, com a análise dos valores de albedo e índice de vegetação, que alterações nas categorias de uso da terra e cobertura vegetal podem interferir diretamente nos padrões de evapotranspiração que, por sua vez, podem refletir na distribuição regional de chuvas, aumento de temperaturas médias e alterações nas temperaturas máximas e mínimas.

Os procedimentos metodológicos adotados, que foram baseados no SEBAL, modelo desenvolvido por Bastiaanssen em 1995 e adaptado por vários outros autores, se mostraram eficientes para mapeamentos e análises em áreas com grande extensão territorial e com poucos dados climáticos disponíveis, visto que utiliza apenas imagens de sensoriamento remoto e dados climatológicos como temperatura média e velocidade dos ventos.

Apesar da margem de erro inferior a 10%, foram identificados alguns pontos problemáticos no modelo, principalmente, na estimativa do fluxo de calor sensível, que interfere diretamente na estimativa de evapotranspiração real. O modelo não considera dados relativos à textura e estrutura dos solos, bem como sua capacidade de armazenamento/perda de água em diferentes situações, o que acaba subestimando ou superestimando os resultados. Outra questão relevante é a pequena quantidade de estações climatológicas com registros consistentes sobre velocidade dos ventos, visto que é um elemento que não apresenta um padrão de comportamento espacial e a simples interpolação destas informações, além do trabalho com dados médios, pode prejudicar os resultados.

Foi feita uma tentativa inicial de se trabalhar com imagens do sensor MODIS/TERRA, obtidas no período da manhã, por volta de 10:30h, mas optou-se por utilizar imagens do sensor MODIS/AQUA, obtidas no período vespertino (14:30h), que apresentaram resultados mais condizentes com a bibliografia utilizada como base. A escolha do software ArcGIS 10.1 ® também foi importante, visto que várias tentativas de programação no software SPRING 5.2 para composição das fórmulas do algoritmo foram frustradas por erros de sistema do próprio software.

Entre as principais conclusões extraídas do processo de pesquisa e modelagem, destacam-se:

- a) Os principais fatores de influência sobre os resultados das estimativas utilizando o SEBAL é o uso da terra e a ocorrência e distribuição espacial/sazonal de chuvas;
- b) O cálculo da temperatura de superfície é primordial ao desempenho do modelo por funcionar como “força motriz” dos processos de evaporação, transpiração e, consequentemente, no balanço de energia. Deve-se tomar cuidado para não calcular a temperatura de brilho, pois os dados precisam de correção de emissividade;
- c) A resolução das imagens MODIS/AQUA não são adequadas para análises locais, em escala detalhada, mas apresentam bons resultados para áreas mais extensas, sendo mais indicadas para estudos regionais. Com essas imagens, os melhores resultados são obtidos a partir do trabalho com as bandas 1 e 2 que apresentam resolução espacial de 250m. Os demais produtos são gerados com resolução espacial de 500 metros.
- d) Como a resolução espacial do mapeamento do saldo de radiação e, consequentemente, dos fluxos de calor e da evapotranspiração, é de 500m, as estimativas referem-se a valores médios das informações contidas naquele pixel. Para realizar uma estimativa mais detalhada, recomenda-se o uso de imagens Landsat (sensores TM, ETM+ ou OLI) que apresentam resolução espacial de 30 metros;
- e) Os valores de albedo de superfície obtidos com o modelo apresentaram índices dentro das faixas citadas na literatura, sendo os valores mínimos registrados sobre corpos d’água e áreas de mata e floresta, estando diretamente relacionados à quantidade de radiação refletida pelos corpos na superfície. Esses valores mostraram-se inversamente proporcionais aos dados estimados de evapotranspiração real: quanto menor o albedo, maiores as taxas de evapotranspiração. Isso leva à conclusão de que, alterações significativas nos padrões de albedo, provocadas por mudanças no uso da terra, podem

alterar os padrões de evaporação e transpiração como, por exemplo, a substituição de vegetação arbórea por áreas agrícolas ou pastagens.

- f) Os valores de índice de vegetação (resolução espacial de 250m) mostraram variação sazonal pouco significativa, sendo importante acessório no mapeamento de uso da terra e cobertura vegetal por permitirem a diferenciação entre áreas de vegetação nativa, silvicultura e agricultura, auxiliando no refinamento do mapeamento realizado com resolução espacial de 500m. Esse índice também mostrou-se fundamental à estimativa do fluxo de calor no solo, visto que, quanto menor a densidade de cobertura do solo por vegetação, maior o fluxo de calor.
- g) Quanto ao saldo de radiação à superfície, considera-se que os valores obtidos na modelagem para a Bacia do Rio Paranaíba encontram-se semelhantes aos registrados por outros estudos, como o de Ferreira e Meirelles (2011) que encontraram valores médios de  $825 \text{ W/m}^2$  para a região Sul do Estado de Goiás. Deve-se ficar atento ao cálculo da radiação de onda curta incidente na superfície, principalmente na determinação do ângulo de incidência dos raios solares que será responsável pela variação sazonal da radiação.
- h) Neste estudo, foram encontrados valores médios superiores a  $950 \text{ W/m}^2$  nos meses de setembro, outubro, novembro e dezembro para o saldo de radiação, com duas situações distintas para os valores de evapotranspiração: nos meses de setembro e outubro, sem a ocorrência de chuvas, com valores baixos de evapotranspiração, e nos meses de novembro e dezembro, com os maiores índices estimados, evidenciando a importância da ocorrência de chuvas regulares aos processos de evaporação e transpiração;
- i) Os valores baixos de saldo de radiação à superfície registrados em janeiro, que deveria apresentar índices próximos ao registrado em dezembro, deve-se à cobertura de nuvens em mais de 70% da área em todas as imagens do mês, que não permitiram uma estimativa mais exata;
- j) Os valores obtidos com a estimativa do fluxo de calor no solo apresentaram padrão espacial coerente com as categorias de uso da terra e cobertura vegetal. Em áreas cobertas por espelhos d'água, o fluxo de calor correspondeu a 30% do saldo de radiação (considerando a média anual), enquanto que as porcentagens para áreas de agricultura, pastagem e solo descoberto foram de respectivamente 10%, 16% e 22%. Em áreas de floresta esse percentual foi de 11%, enquanto que em áreas de cerrado foi de 14%, evidenciando que quanto mais densa a cobertura vegetal, maior a proteção do solo e,

consequentemente, menor o fluxo de calor. Em áreas de silvicultura esse percentual chega a 7%.

- k) Ao estimar o fluxo de calor sensível, após várias correções e calibrações para encontrar a resistência aerodinâmica ( $R_{ah}$ ) e a diferença de temperatura ( $dT$ ), chegou-se a um valor médio de  $282 \text{ W/m}^2$  (média anual considerando todos os tipos de uso da terra), sendo os maiores valores identificados sobre áreas urbanas e áreas de solo descoberto, principalmente entre os meses de julho e outubro. Verificou-se que a água é um elemento fundamental na regulação destes valores, visto que sobre espelhos d'água, em áreas irrigadas e no período de chuvas, esses valores são menores. Identificou-se um percentual de 9% do fluxo de calor sensível em relação ao balanço de radiação em superfícies cobertas por água (média anual), enquanto que o percentual em áreas irrigadas é de 30%. Em áreas de silvicultura, florestas e cerrados esses percentuais são de 18%, 27% e 32%, respectivamente, demonstrando a importância da vegetação para esta variável. As áreas de produção apresentam valores estimados de fluxo de calor sensível mais elevado, sendo registrados percentuais de 32% para áreas agrícolas, 40% para pastagens, 56% para solo descoberto e 47% para áreas urbanas.
- l) O fluxo de calor latente, obtido quando se extraem os valores de fluxo de calor no solo e fluxo de calor sensível do saldo de radiação é a principal variável utilizada na estimativa da evapotranspiração por corresponder à energia disponível para provocar os processos de evaporação e transpiração, aliado à presença de água nas superfícies. Na bacia do Rio Paranaíba, os maiores valores de fluxo de calor latente foram registrados sobre áreas cobertas por água, silvicultura e florestas que, consequentemente, são as áreas que apresentam os maiores valores de evapotranspiração real. Em corpos hídricos, o fluxo de calor latente corresponde a 61% do saldo de radiação médio anual, enquanto que em áreas de silvicultura, florestas e cerrados esses valores são de, respectivamente, 75%, 62% e 53%, evidenciando que o processo de transpiração apresenta maior peso que o processo de evaporação. Não foram encontradas grandes diferenças entre áreas agrícolas irrigadas e áreas sem irrigação, fator que se deve principalmente à baixa resolução espacial da imagem do sensor MODIS/AQUA. Os menores valores de fluxo de calor latente foram registrados sobre áreas de pastagem, solo descoberto e áreas urbanas, que também apresentam valores mais baixos de evapotranspiração, chegando próximo a zero em áreas com solo arenoso descoberto.
- m) A estimativa de evapotranspiração real diária mostrou resultados coerentes com outros estudos utilizados como base para a modelagem. Nota-se que a principal relação na

variação espacial destas informações está relacionada com os diferentes tipos de uso da terra e cobertura vegetal, sendo diretamente proporcionais aos valores de fluxo de calor latente encontrados. Outros fatores fundamentais para a estimativa de evapotranspiração real, que podem ser percebidos na análise sazonal dos dados, são a ocorrência de chuvas, já que pra haver fração evaporativa é necessário que o sistema seja alimentado e a variação da umidade relativa do ar. Em geral, os valores médios estimados encontram-se abaixo dos valores calculados como evapotranspiração de referência segundo metodologia da FAO em 34%, considerando que os valores de referência são calculados em condição de abrigo. Apenas os meses de novembro e dezembro apresentaram uma diferença de 5% em relação aos valores de referência.

- n) Os maiores valores de evapotranspiração real estimada relacionam-se a áreas cobertas por espelhos d'água (1,1% da área total da bacia), com valores médios anuais de 5,83mm/dia e picos de 7,95mm/dia no final do mês de setembro, auge do período seco na região. As áreas de silvicultura apresentaram valores médios de evapotranspiração real estimada superiores às áreas de florestas e cerrados, o que se deve, principalmente, às características das plantas utilizadas nesses plantios, predominantemente o eucalipto. Os valores médios de evapotranspiração em áreas de silvicultura foi de 5,5mm/dia, com picos de 6,25mm/dia no final de setembro. Se considerarmos esse período como o máximo de déficit hídrico nos solos, percebe-se que o processo de transpiração sobressai aos processos de evaporação em áreas vegetadas, além de indicar um consumo excessivo de água do subsolo por essas culturas. Em áreas de florestas e cerrados, os valores médios de evapotranspiração foram de 5,15mm/dia e 3,89mm/dia, respectivamente.
- o) As áreas de cerrado apresentam comportamento muito parecido com áreas de pastagem quando são analisados os dados de evapotranspiração real estimada, visto que as áreas de pastagem apresentam média anual de 3,38mm/dia, o que pode ser explicado pela baixa densidade de vegetação arbórea em cerrados abertos e presença de vegetação arbustiva e gramíneas, que vão apresentar efeitos de cobertura parecidos aos da pastagem, embora os padrões de uso e conservação dos solos sejam diferentes.
- p) Não foram percebidas diferenças significativas entre os valores médios de evapotranspiração em áreas de agricultura de sequeiro e agricultura irrigada, o que se deve principalmente à baixa resolução espacial da imagem do sensor MODIS/AQUA, sendo necessário utilizar imagens Landsat para estimativa de evapotranspiração para essas áreas. Enquanto a média anual de evapotranspiração real estimada para áreas de

agricultura irrigada foi de 4,24mm/dia, os valores encontrados em área de agricultura sem irrigação foi de 4,44mm/dia, contrários a todos os resultados verificados na literatura de base. Nesse sentido, as imagens MODIS não apresentam bons resultados para estimativa de evapotranspiração para áreas irrigadas. Considera-se, ainda, que essas áreas irrigadas na bacia do Rio Paranaíba não apresentam continuidade espacial, além de apresentar áreas irrigadas adjacentes a áreas sem irrigação, tornando a estimativa falha para pixel com 500m de resolução espacial. Apenas nos meses de julho e agosto as áreas de agricultura irrigada apresentaram valores significativamente superiores às demais áreas de agricultura.

- q) Nesse estudo, ficou clara a influência de áreas vegetadas sobre os valores de evapotranspiração, indicando que a transpiração das plantas são responsáveis pelo maior percentual do total estimado. Áreas de solo descoberto e áreas urbanizadas, apresentaram evapotranspiração real média de 1,8mm/dia e 2,4mm/dia respectivamente, evidenciando que mudanças bruscas nos padrões de uso da terra e cobertura vegetal arbórea podem interferir negativamente no ciclo hidrológico, podendo até mesmo reduzir os volumes de chuva em nível local/ regional, afirmação que precisa de uma análise temporal mais completa para ser comprovada.

Frente aos resultados obtidos com a aplicação do modelo, recomenda-se que sejam utilizadas imagens de diferentes períodos do ano para estimativa e análise das variáveis, bem como o uso de imagens de sensores diferentes para comparação. Imagens Landsat apresentam maior confiabilidade de resultados por apresentarem resolução espacial de 30 metros, reduzindo a matriz de confusão ocasionada pela resolução espacial do sensor MODIS.

Torna-se necessário, também, desenvolver o modelo SEBAL em softwares de distribuição livre, visto que o preço das licenças do ArcGIS podem significar uma barreira para o desenvolvimento de estudos como este. Como encaminhamento, sugere-se tentar desenvolver o modelo em versões mais recentes do SPRING que não apresentem problemas de processamento e no Quantum GIS, que tem se mostrado a alternativa gratuita mais viável para substituição do ArcGIS.

Recomenda-se, também, que sejam estudadas adaptações ao modelo SEBAL que visem incluir informações sobre as características do solo na modelagem, bem como meios para reduzir a margem de erro relacionada à estimativa da resistência aerodinâmica da superfície, conferindo maior confiabilidade à estimativa do fluxo de calor sensível.



## REFERÊNCIAS

AHMAD, M.-UD-DIN, BASTIAANSEN, W. G. M. Retrieving soil moisture storage in the unsaturated zone using satellite imagery and bi-annual phreatic surface fluctuations.

**Irrigation and Drainage Systems**. v. 17, p. 141 – 161. 2003.

ALLEN, R. G. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. **Journal of Hydrology**, v. 229, p. 27 – 41. Março de 2000.

ALLEN, R. G. et al. **SEBAL** (Surface Energy Balance Algorithms for Land) advanced training and users manual – Idaho implementation. Idaho: Idaho University, USA, 2002. 98p.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Plano de recursos hídricos e do enquadramento dos corpos hídricos superficiais da bacia hidrográfica do Rio Paranaíba**. Brasília: ANA, 2013. 312 p.

ANDERSON, L. O. et al. **Sensor MODIS: uma abordagem geral**. São José dos Campos: INPE, 2003. 54p.

ANDRADE, R. G. et al. **Estimativa do albedo e do saldo de radiação à superfície utilizando imagem MODIS/AQUA na bacia do Rio Ji-Paraná/RO**. Campinas, SP: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010. 24p.

ARRAES, C. L.; LAMPARELLI, R. A. C.; ROCHA, J. V. Potencial da TST registrado pelo sensor MODIS em medir temperatura do ar comparado àquelas estimadas pelo ECMWF e por estações meteorológicas. In: SBSR, SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, 2011, Curitiba/PR. **Anais do XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Curitiba: INPE, 2011. p.0108-0115.

ATTANASIO, C. M. **Planos de manejo integrado de microbacias hidrográficas com uso agrícola: uma abordagem hidrológica na busca da sustentabilidade**. 206 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

AYENNEW, T. Evapotranspiration estimation using thematic mapper spectral satellite data in the Ethiopian rift and adjacent highlands. **Journal of Hydrology**, v.279, pp. 83 – 93. 2003.

AYOADE, J. O. **Introdução à Climatologia para os Trópicos**. 10ª Ed. Rio de Janeiro: Bertrand do Brasil, 2010.

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. et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 2. Validation. **Journal of Hydrology**, v. 212 – 213, pp. 213 – 229. 1998.

BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL-based sensible and latent heat flux in the irrigated Gediz basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v. 229, pp. 87 – 100. 2000.

BDMEP – **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>> Acesso em 10 abr. 2014.

BERTALANFY, L. von. **Teoria geral dos sistemas**. Petrópolis: Vozes, 1973.

BERTRAND, G. **Paisagem e geografia física global: esboço metodológico**. São Paulo: IGEOG/USP, 1972. 27p. (Ciências da Terra , n.13)

BEZERRA, B. G. **Balanço de energia e evapotranspiração em áreas com diferentes tipos de cobertura de solo no Cariri cearense através do algoritmo SEBAL**. Dissertação. UFCG, Campina Grande, PB. 2006.

BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B.; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM-Landsat5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, vol.23, n.3, p.305-317, 2008.

BLASCHKE, T.; GLÄSSER, C.; LANG, S. Processamento de imagens num ambiente integrado SIG/Sensoriamento Remoto – Tendências e Consequências. In: BLASCHKE, T; KUX, H. **Sensoriamento Remoto e SIG Avançados**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. p. 11-18.

BOTELHO, R. G. M. Planejamento ambiental em microbacia hidrográfica. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. J. BOTELHO, R. G. M. (org). **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. 269-300.

BRASIL. **Lei n. 9433** de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. Disponível em <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm)> Acesso em 15 ago. 2014.

BRUM, A. J.A. **Modernização da Agricultura:** trigo e soja. Petrópolis: Vozes.; Ijuí: FIDENE, 1988. p. 31- 89.

BRUTSAERT, W. **Evaporation into the atmosphere:** Theory, history, and applications. Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Company. 1982.

CÂMARA, G. DAVIS, C. MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à ciência da geoinformação.** Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>> Acesso em 15 ago. 2014.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia.** São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1980.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais.** São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 2000. 236p.

CHRISTOFOLETTI, A. L. H. Procedimentos de análise utilizados no estudo da precipitação. **Geociências**, São Paulo, v.11, n.1, p. 75-98, 1992.

CLARKE, R.; KING, J. **O Atlas da água:** o mapeamento completo do recurso mais precioso do Planeta. São Paulo: Publifolha, 2005, 128 p.

DEERING, D.W. et al. Measuring "forage production" of grazing units from Landsat MSS data. In: **International Symposium on Remoting Sensing of Environment, 10, Ann Arbor, Proceedings.** Ann Arbor, MI: ERIM, 1975. v.2, p. 1169-1178.

EHLERS, M. Sensoriamento Remoto para usuários de SIG – Sistemas Sensores e Métodos: entre as exigências do usuário e a realidade. In: BLASCHKE, T; KUX, H. **Sensoriamento Remoto e SIG Avançados.** São Paulo: Oficina de Textos, 2007. p. 19-38.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Brasília, Serviço de Produção de Informação, 2006. 412p.

FAO - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA. **ETo Calculator.** Manual (38p) e software Version 3.1. 2009. Land and Water Digital Media Series Nº 36.

FERREIRA, A. S.; MEIRELLES, M. S. P. Implementação preliminar do modelo SEBAL para estimativa de evapotranspiração na mesorregião Sul Goiano. In: SBSR, SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, 2011, Curitiba/PR. **Anais do XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Curitiba: INPE, 2011. p.5576-5583.

FONSECA, A. D.; FERNANDES, J. C. **Detecção Remota**. Lisboa: Lidel – edições técnicas ltda., 2004. 224p.

GIACOMONI, H. M. **Estimativa da evapotranspiração regional por meio de técnicas de sensoriamento remoto integradas a modelos de balanço de energia**: aplicação no estado do Rio Grande do Sul. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005. 193p.

GIACOMONI, H.M.; MENDES, C.A.B. Estimativa de Evapotranspiração Regional por meio de Técnicas de Sensoriamento Remoto Integradas a Modelo de Balanço de Energia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, vol 13, n. 4, p. 33-42, out/dez 2008.

GOMES, H. B. **Balanço de Radiação e energia em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e cerrado no estado de São Paulo mediante imagens orbitais**. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, 2009. 108p.

HAGGETT, P.; CHORLEY, R. J. Modelos, paradigmas e a nova geografia. In: **Modelos físicos e de informação em Geografia**. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos, 1975. P.1-19.

HARISON, L. P. Fundamental concepts and definitions relating to humidity. In Wexler, A. (ed). **Humidity and Moisture**. V. 3. Reinhold Publishing Company. New York, EUA. 1963.

HEMAKUMARA, H. M. et al. Evapotranspiration fluxes over mixed vegetation areas measured from large aperture scintillometer. In **Agricultural Water Management**, v. 58, p. 109-122. 2003.

KAMPEL, M. Características gerais dos satélites NOAA: histórico, instrumentos e comunicação de dados. In: FERREIRA, N. J. (org.) **Aplicações ambientais brasileiras dos satélites NOAA e TIROS-N**. São Paulo: Oficina de textos, 2004. p. 15-40.

KIMURA, R. et al. Evapotranspiration estimation over the river basin of the Loess Plateau of China base on remote sensing, **Journal of Arid Environments**, v. 68, p. 53-65. 2007.

KONGO, V. M., JEWITT, G. P. W. Preliminary investigation of catchment hydrology in response to agricultural water use innovations: A case study of the Potshini catchment – South Africa. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 31, p.976-987. 2006.

LANNA, A.E.L. **Gerenciamento de bacia hidrográfica: aspectos conceituais e metodológicos**. Brasília: IBAMA, 1995. 171 p.

LATORRE, M. L.; SHIMABUKURO, Y. E.; ANDERSON, L. O. Produtos para ecossistemas terrestres – MODLAND. In: RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. (Org). **O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos, SP.: Ed. Parêntese, 2007. p.23-35.

LEITE, M. R.. **Sensoriamento remoto aplicado à análise temporal da relação uso da terra/ temperatura e albedo de superfície na bacia do Rio Vieira no norte de Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geografia – Universidade Federal de Uberlândia, 2011. 111p.

LIMA, W. P. **Produção de água: geração do deflúvio em microbacias florestais**. Disponível em: <<http://www.esalq.usp.br/departamentos/lcf/lab/lhf/arquivos/CAPITULO%205.pdf>> Acesso em 15 ago. 2014.

LUCHIARI, A; KAWAKUBO, F. S.; MORATO, R. G. Aplicações do Sensoriamento Remoto na Geografia. In: VENTURI, L. A. B. (org) **Praticando a Geografia: técnicas de campo e laboratório em geografia e análise ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. p.33-54.

MANNING, J. C. **Applied principles of hidrology**. 3ªed. New Jersey: Prentice Hall, 1997. 276p.

MARIANO, Z. F. **A importância da variável climática na produtividade de soja no sudoeste de Goiás**. 253 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual de São Paulo, Rio Claro, 2005.

MARTINS, A. P.; ROSA, R. Mapeamento da temperatura superficial terrestre (TST) na bacia do Rio Paranaíba com o uso de imagens do sensor MODIS/AQUA. In: SBCG, SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA, 10, 2014, Curitiba/PR. **Anais do X Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica**. Curitiba: ABCLIMA, 2014. p.1258-1269.

MAUAD, F. F.; LIMA, G. Planejamento estratégico de sistemas hídricos. In: VALÊNCIO, N. F. L. S.; MARTINS, R. C. (orgs.) **Uso e Gestão dos recursos hídricos no Brasil: desafios teóricos e político-institucionais**. São Carlos: RiMa, 2003. p.99-126.

MENDES, C. A. B. Gestão de recursos hídricos: bacias dos rios Mundaú e Paraíba. In: **Revista Sociedade e Natureza**. Uberlândia: EDUFU. Ano 3, 1991. p. 53-58.

MENDES, P. C. **Gênese e estrutura espacial das chuvas na cidade de Uberlândia/MG**. 242 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia (MG), 2001.

MENDONÇA, J. C. **Estimação da evapotranspiração regional utilizando imagens digitais orbitais na região Norte Fluminense, RJ**. Tese. Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil. 2007.

MENDONÇA, J. C. et al. Aplicação do algoritmo SEBAL e imagens MODIS para estimativa do fluxo de calor no solo (G) na região Norte Fluminense, RJ, Brasil. In: SBSR, SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, 2009, Natal/RN. **Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Natal: INPE, 2009. p.293-300.

MENDONÇA, J. C. et al. Análise do albedo à superfície a partir de produtos MODIS. In: CBMET, CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 16, 2010, Belém/PA. **Anais do XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia**. Belém, 2010. p.1-5.

MING, T. C.; LIU, W. T. H. Estimativa de albedo, temperatura e NDVI do estado de São Paulo através de dados AVHRR do satélite NOAA. In: CBM, CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11, 2000. Rio de Janeiro/RJ. **Anais do XI Congresso Brasileiro de Meteorologia**. Rio de Janeiro, 2000. p. 3843-3850.

MODIS. **Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer**. Disponível em <<http://modis.gsfc.nasa.gov>> Acesso em 15 ago. 2014.

MORAGAS, W. M. **Análise do sistema ambiental do alto rio Claro - Sudoeste de Goiás: Contribuição ao planejamento e gestão**. Tese (Doutorado em Geografia) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2005.

MOREIRA, L. C. J. et. al. Variabilidade local e regional da evapotranspiração estimada pelo algoritmo SEBAL. In: **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v30, n06, Nov/dez2010. P.1148-1159.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e metodologias de aplicação**. 4ª ed. Viçosa, MG: Editora da Universidade Federal de Viçosa, 2011. 422p.

MOTA, F. S. **Meteorologia agrícola**. São Paulo: Nobel. 1987, 376p.

MRTWEB, MODIS Reprojection Tool Web Interface. **Enhanced MODIS data discovery and delivery services from the LP DAAC**. Disponível em:  
<<http://www.mrtweb.cr.usgs.gov>> Acesso em 15 ago. 2014.

NICÁCIO, R. M. **Evapotranspiração real e umidade do solo usando dados de sensores orbitais e a metodologia SEBAL na bacia do Rio São Francisco** (Rio de Janeiro). 2008. 337f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1979.

NOBRE, C. et al, Amazonian deforestation and regional climate change. **Journal climate**. Washington DC. v. 4. p.957-988. 1991.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 3ª ed. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 2008. 363p.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. Routledge, New York. 1987.

REES, W. G. **Physical principles of Remote Sensing**. 2ª ed. Edinburgh: Cambridge University Press, 2001. 343p.

ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C.; BARBIERI, V. **Planilhas no ambiente excel TM para cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial**. Piracicaba: Departamento de Física e Meteorologia da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2002. (Versão 6.3).

ROSA, R. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**. 7ª ed. Editora EDUFU. Uberlândia, 2009. 262p.

ROSA, R.; SANO, E. E. Uso da Terra e Cobertura Vegetal na Bacia do Rio Paranaíba. **CAMPO-TERRITÓRIO: revista de geografia agrária**, v.09, p.19, p.32-56. Outubro de 2014.

SANTOS, C. R. **Diagnóstico ambiental e uma proposta de uso da bacia hidrográfica do Córrego Bebedouro – Uberlândia/MG**. 129 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.



SANTOS, R. F. CARVALHAIS, H. B. PIRES, F. Planejamento ambiental e sistemas de informações geográficas. **Caderno de Informações Georreferenciadas**. v.1, n.2, 1997. Disponível em: <<http://www.cpa.unicamp.br/revista/cigv1n2a2.html>> Acesso em 15 ago. 2014.

SOARES, J.V.; BATISTA, G.T.; SHIMABUKURO, Y.E. Histórico e Descrição. In: RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y.E.; CEBALLOS, J.C. (Org.). **O Sensor MODIS e suas aplicações no Brasil**. São José dos Campos, SP.: Ed. Parêntese, 2007. p.1-22.

SOUZA FILHO, J. D. C. et al. Variação sazonal do balanço de radiação em uma floresta tropical no nordeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3b, p. 318-330. 2006.

SPERA, T. S. et. al. **Solos areno-quartzosos no cerrado**: problemas, características e limitações ao uso. Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 1999, n.7, 48p.

TASUMI, M. et al. Operational aspects of satellitebased energy balance models for irrigated crops in the semi-arid U.S. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 19, p. 355-376. 2005.

THORNTHWAITE, C. W. MATHER, J.R. **The water balance**. Climatology, Drexel Institute of Tecnology, 1955. 104p.

TRENTIN, R. et al. Análise comparativa da temperatura de superfície MODIS e temperatura do ar em diferentes situações no estado do Paraná. In: SBSR, SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, 2011, Curitiba/PR. **Anais do XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Curitiba: INPE, 2011. p.7745-7752.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F.J.L. DO. **Meteorologia descritiva**: fundamentos e aplicações brasileiras. São Paulo: Nobel, 1986. 374p

TUCCI, C. E. M.; MENDES, C. A.. **Avaliação ambiental integrada de bacia hidrográfica**. Brasília: MMA, 2006. 302 p.

UCHOA, H. N.; FERREIRA, P. R. **Geoprocessamento com software livre**. 2004. 31p. Disponível em: <<http://www.geolivre.org.br>> Acesso em 15 ago. 2014.

UDA, P. K. **Avaliação da evapotranspiração real da bacia do Alto Rio Negro, região sul brasileira, por meio do modelo SEBAL.** 163f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

VALENTE, O. F; GOMES, M. A. Produtor de água – um estudo de caso e propostas de trabalho. In: PROBACIAS – Programa de Gestão de Bacias Hidrográficas. **Água em notícias**, n.º05, outubro de 2003. Disponível em:  
<<http://www.saevicosa.com.br/cmcn/produtoragua/estudo%20de%20caso%20e%20prproposta%20de%20trabalho.htm>> Acesso em 15 ago. 2014.

VALENTE, R. O. A. **Análise da estrutura da paisagem na bacia do Rio Corumbataí, SP.** 162 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

VINAUD, N. C. A. **A transformação do espaço geográfico em espaço literário, em Vila dos Confins, de Mario Palmério.** Monografia (Bacharelado em Geografia) – Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2008. 86p.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. M. **Geoestatística** – conceitos e aplicações. São Paulo: Oficina de textos, 2013. 215p.

XAVIER DA SILVA, J.; ZAIDAN, R. T. **Geoprocessamento e análise ambiental:** aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004. 368 p.