

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – UFCG
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS – CTRN
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS – UACA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA – PPGMET**

THOMÁS ROCHA FERREIRA

**ESTIMATIVA DO USO DE ÁGUA NA IRRIGAÇÃO NO POLO
PETROLINA/JUAZEIRO POR SENSORIAMENTO REMOTO**

Campina Grande, PB

Fevereiro, 2018.

THOMÁS ROCHA FERREIRA

**ESTIMATIVA DO USO DE ÁGUA NA IRRIGAÇÃO NO POLO
PETROLINA/JUAZEIRO POR SENSORIAMENTO REMOTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, para obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva

Área de concentração: Agrometeorologia

Subárea: Radiação e Sensoriamento Remoto

Campina Grande, PB

Fevereiro, 2018.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

F383e Ferreira, Thomás Rocha.
Estimativa do uso de água na irrigação no polo Petrolina/Juazeiro por sensoramento remoto / Thomás Rocha Ferreira. – Campina Grande, 2018.
65 f. il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.
"Orientação: Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva".

1. Evapotranspiração Real Diária. 2. Evapotranspiração Real Sazonal.
3. SEBAL. I. Silva, Bernardo Barbosa da. II. Título.

CDU 556.18(043)

THOMÁS ROCHA FERREIRA

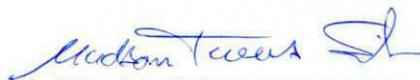
ESTIMATIVA DO USO DE ÁGUA NA IRRIGAÇÃO NO POLO
PETROLINA/JUAZEIRO POR SENSORIAMENTO REMOTO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 28/02/2018

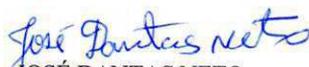
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. BERNARDO BARBOSA DA SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. MADSON TAVARES SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. JOSÉ DANTAS NETO
Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Campina Grande

*Aos pilares que me sustentam, mãe, pai,
irmãos e noiva, este dedico.*

AGRADECIMENTOS

Sem sombra de dúvida, meus pais, Marli Ferreira e Luiz Carlos Ferreira, foram de fundamental importância para tudo aquilo que sou e que fiz. Um simples “muito obrigado” não corresponde à complexa dívida que tenho para com eles. À vocês meus pais, minha eterna gratidão.

Sou muito grato também, ao meu irmão Thiago, que como exemplo de honestidade, irmandade e tranquilidade, me trouxe paz e alegria em momentos de caos e de dúvidas. Hail to you brother!

Meus agradecimentos à minha noiva Jéssica Delgado, que com muita paciência e compreensão insiste em discutir sobre diversos assuntos comigo, e é também responsável pela personalidade mais livre e despreocupada que tenho hoje, agradeço pelo carinho e dedicação. Este trabalho e espero que muitos outros depois deste, é também fruto do nosso relacionamento.

Um Agradecimento (with capital letter) especial ao meu amigo e orientador, Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva, pelo exemplo de profissionalismo, pelo respeito com o qual sempre se dirigiu a mim, pela confiança na execução deste trabalho e por fim pelos conhecimentos transmitidos tanto científicos quanto pessoais. O senhor é uma fonte de inspiração para seus alunos. Professor, muito obrigado!

Não poderia deixar de agradecer meu orientador na graduação, Prof. Dr. Frederico Di Pace, pelo respeito, por ter me iniciado nessa jornada acadêmica e acima de tudo, por ter confiado nos meus objetivos e potencial em alcançá-los. Obrigado pelo apoio e inspiração prof.!

Aos meus muitos amigos, mas em especial ao Edivaldo Serrão, colega de apartamento, companheiro em diversas discussões e amigo nos momentos de dúvidas, ao Leydson Galvínio, pelas inúmeras conversas construtivas, conselhos e pelo companheirismo nas atividades físicas, a Pâmela Ávila, pelos momentos de descontração, amizade e, juntamente com Leydson, pelo “apadrinhamento” durante minha estadia em Campina Grande. Agradeço também ao Maurício Rebouças, pelas discussões que me proporcionaram uma visão e percepção diferente em análises científicas.

Não posso deixar de agradecer também aos professores da UFAL que contribuíram na minha formação acadêmica e serviram de inspiração para continuar com meus objetivos. Em especial, agradeço ao Prof. Msc. Hélio Soares, Dr. Luiz Molion, Msc. Marco Maringolo, Dr. Ricardo Amorim, Dr. Heliofábio Gomes, Dr. Vladimir Levit e Prof.^a Dra. Natália Fedorova. E também aos professores do Mestrado em Meteorologia Drs. Bernardo Silva, Carlos Santos, Ivaldo Brito, Magaly Correia e Madson Silva.

À todos, o meu muito obrigado.

RESUMO

O cenário que envolve a bacia hidrográfica do submédio do rio São Francisco e o polo de irrigação Petrolina/Juazeiro é caracterizado de um lado por uma grande disponibilidade de água e, por outro, um intenso crescimento urbano e econômico, o que acarreta em uma demanda crescente por água, tanto para consumo humano, quanto industrial e agrícola. O objetivo deste trabalho é avaliar o volume de água empregado no polo de irrigação Petrolina/Juazeiro, com vistas a observar sua expansão entre 1987 e 2017, e sua aplicação no decurso de um ano (2015) através de imagens orbitais e do algoritmo SEBAL. O SEBAL propõe estimar a evapotranspiração através de um método semi-empírico de estimativa do fluxo de calor latente (LE). A ideia se baseia em obter LE como resíduo do balanço de energia. Para tanto, foram utilizadas imagens dos sensores OLI e TIRS do satélite Landsat 8, do sensor TM do Landsat 5 e imagens do sensor MODIS, à bordo do TERRA e do AQUA. Dados meteorológicos auxiliares da estação meteorológica de Petrolina e de Remanso-BA foram utilizados nos cálculos. Os resultados indicaram que as áreas irrigadas quadruplicaram no polo de irrigação Petrolina/Juazeiro em um espaço de tempo de 30 anos. A radiação solar incidente diária se mostrou determinante para o processo de evapotranspiração, pois mesmo com a maior condição de umidade na superfície em 24/06/1987 do que em 17/01/2017, a radiação solar incidente na cena de 2017 foi superior, definindo um cenário mais propício ao processo da evapotranspiração. Com a expansão de aproximadamente 300% ao longo dos últimos 30 anos, a área irrigada encontra-se com 73 mil ha, dos quais em média a vazão de água em m³/s estimada por sensoriamento remoto para o dia 17/01/2017, foi de 42,3 m³/s, ou ainda, 3,7 milhões de m³/dia. A vazão média estimada para o ano de 2015 foi de 62,4 m³/s para todo o perímetro irrigado, com um Erro Relativo Médio de 18% e Erro Médio Absoluto de 14 milhões de m³/s com relação a necessidade hídrica no período sazonal em questão. Ao longo do ano de 2015 a estimativa da irrigação total acumulada nas parcelas irrigadas foi de 1,96 bilhão de m³ o que representa em dez meses de irrigação o volume atual do lago Sobradinho (1,6 bilhão de m³). O volume anual de água da outorga com finalidade à irrigação no polo Petrolina/Juazeiro foi de 7,4 bilhões de m³ em 2015, indicando um valor quase quatro vezes maior que a exigência hídrica estimada para 2015 por esta pesquisa (1,96 bilhão de m³), o suficiente para atingir o volume atual do lago sobradinho (1,60 bilhão de m³) em apenas 3 meses. Estas informações elucidam a necessidade de monitorar a quantidade de água empregada nas irrigações e ponderar sobre a prioridade no uso da mesma, se seria para irrigação ou para consumo humano, uma vez que o semiárido brasileiro é castigado com secas recorrentes.

Palavras-chave: Evapotranspiração real diária, evapotranspiração real sazonal, SEBAL.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da área de estudo: Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro	10
Figura 2: Fluxograma das etapas do processamento do balanço de radiação à superfície para o TM do Landsat 5	16
Figura 3: Fluxograma das etapas do processamento do balanço de radiação à superfície para o OLI/TIRS do Landsat 8	16
Figura 4: Fluxograma das etapas do processamento do balanço de radiação à superfície para o MODIS	21
Figura 5: Fluxograma das etapas do downscaling realizado no mapa de temperatura de superfície	23
Figura 6: Fluxograma do processo iterativo de obtenção do fluxo de calor sensível – H.....	24
Figura 7: Reflectância nas faixas do IV-médio IV-próximo e azul em composição RGB nos dias 24/06/1987 (a) e 17/01/2017 (b) para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro	32
Figura 8: Exemplo 1 de distinção das parcelas irrigadas. Reflectância nas faixas do IV-médio IV-próximo e azul em composição RGB no dia 17/01/2017 (a) aproximação de uma área do recorte (b) reconhecimento das áreas irrigadas (c) e NDVI > 0,4 (d) para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro.....	33
Figura 9: Exemplo 2 de distinção das parcelas irrigadas. Reflectância nas faixas do IV-médio IV-próximo e azul em composição RGB no dia 17/01/2017 (a) aproximação de uma área do recorte (b) reconhecimento das áreas irrigadas (c) e NDVI > 0,4 (d) para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro.....	34
Figura 10: NDVI nos dias 24/06/1987 (a) e 17/01/2017 (b) para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro.....	35
Figura 11: Albedo instantâneo da superfície nos dias 24/06/1987 (a) e 17/01/2017 (b) para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro	36

Figura 12: Saldo de radiação instantâneo, R_n ($W.m^{-2}$) nos dias 24/06/1987 (a) e 17/01/2017 (b) para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro	37
Figura 13: Saldo de radiação diário, $R_n,24h$ ($W.m^{-2}$) nos dias 24/06/1987 (a) e 17/01/2017 (b) para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro	38
Figura 14: Fluxo de calor sensível instantâneo, H ($W.m^{-2}$) nos dias 24/06/1987 (a) e 17/01/2017 (b) para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro .	40
Figura 15: Temperatura da superfície instantânea, T_s ($^{\circ}C$) nos dias 24/06/1987 (a) e 17/01/2017 (b) para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro	41
Figura 16: Fluxo de calor latente instantâneo, LE ($W.m^{-2}$) nos dias 24/06/1987 (a) e 17/01/2017 (b) para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro .	42
Figura 17: Fração evaporativa instantânea, FE_i ($W.m^{-2}$) nos dias 24/06/1987 (a) e 17/01/2017 (b) para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro	43
Figura 18: Evapotranspiração real diária, ET_{24h} (mm) nos dias 24/06/1987 e 17/01/2017 para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro	44
Figura 19: NDVI no dia 18/01/2015 para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro	47
Figura 20: T_s ($^{\circ}C$) a partir do produto MOD11A1 no dia 18/01/2015 para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro.....	49
Figura 21: T_s ($^{\circ}C$) a partir do downscaling no dia 18/01/2015 para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro.....	49
Figura 22: Albedo da superfície (%) no dia 18/01/2015 para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro	50
Figura 23: Fluxo de calor sensível instantâneo ($W.m^{-2}$) no dia 18/01/2015 para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro	51
Figura 24: Fluxo de calor latente instantâneo ($W.m^{-2}$) no dia 18/01/2015 para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro	51

Figura 25: Fração evaporativa instantânea (%) no dia 18/01/2015 para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro.....	52
Figura 26: Saldo de radiação médio diário ($W.m^{-2}$) no dia 18/01/2015 para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro.....	53
Figura 27: Evapotranspiração real diária, ET,24h (mm) no dia 18/01/2015 para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro	53
Figura 28: Gráfico sazonal da Evapotranspiração acumulada, ETr,s_acum (m^3); Irrigação estimada (m^3) e Irrigação aplicada (m^3) do polo de irrigação Petrolina/Juazeiro para o ano de 2015	55

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1:** Descrição das bandas do TM do Landsat 5, com os correspondentes intervalos de comprimento de onda, coeficientes de calibração [radiância mínima – a e máxima – b para o período: antes de maio/2003 (b1), maio/2003 a abril/2007 (b2), após abril 2007(b3)] e irradiancias espectrais no topo da atmosfera ($K_{\lambda,b}$) (CHANDER et al., 2009) 12
- Tabela 2:** Descrição das bandas do OLI e do TIRS do Landsat 8, com os correspondentes intervalos de comprimento de onda (LANDSAT, 2013) 12
- Tabela 3:** Especificações das camadas do produto MOD09GQ do sensor MODIS (VERMOTE, 2015)..... 13
- Tabela 4:** Especificações das camadas do produto MOD11A1 do sensor MODIS (WAN, 2015) 14
- Tabela 5:** Imagens interpoladas (DOA) e interpolação (DOA) para os períodos em que não havia imagens do MODIS disponíveis28
- Tabela 6:** Hora (UTC) ângulo de elevação do Sol, E (°); quadrado do inverso da distância relativa Terra-Sol, dr (adimensional); cosseno do ângulo zenital solar, $\cos Z$ (adimensional); temperatura do ar, T_a (°C); pressão atmosférica, P_a (kPa); umidade relativa, UR (%); velocidade do vento, v (m/s^2); transmissividade atmosférica, τ_{sw} (adimensional) e radiação solar global instantânea, R_s ($W.m^{-2}$) na passagem dos satélites Landsat 5 e 8 no meridiano local para os dias selecionados..... 30
- Tabela 7:** Radiação solar diária no topo da atmosfera, R_{stoa} ($MJ.m^{-2}$); radiação solar global diária, R_{s24h} ($MJ.m^{-2}$); transmissividade atmosférica diária, τ_{sw24h} (adimensional) na passagem dos satélites Landsat 5 e 8 no meridiano local para os dias selecionados31
- Tabela 8:** Hora (UTC); quadrado do inverso da distância relativa Terra-Sol, dr (adimensional); cosseno do ângulo zenital solar, $\cos Z$ (adimensional); temperatura do ar, T_a (°C); pressão atmosférica, P_a (kPa); umidade relativa, UR (%); velocidade do vento, v (m/s^2); transmissividade atmosférica, τ_{sw} (adimensional) e radiação solar global instantânea, R_s ($W.m^{-2}$) na passagem dos satélites TERRA e AQUA no meridiano local para os dias selecionados 46

Tabela 9: Radiação solar diária no topo da atmosfera, R_{stoa} (MJ.m⁻²); radiação solar global diária, R_{s24h} (MJ.m⁻²); transmissividade atmosférica diária, τ_{sw24h} (adimensional) na passagem dos satélites TERRA e AQUA no meridiano local para os dias selecionados47

Tabela 10: Volume anual de água da outorga de direito de uso de recursos hídricos, com finalidade à irrigação no polo Petrolina/Juazeiro, por município, e número de requerentes da outorga.....55

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

Abimaq	Associação Brasileira da Indria de Máquinas e Equipamentos
ANA	Agência Nacional de guas
BHSRSF	Bacia Hidrográfica do Submédio do Rio São Francisco
CBHSF	Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco
CODEVASF	Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
METRIC	Mapping Evapotranspiration at high resolution and with Internalized Calibration
NDVI	ndice de vegetação por Diferença Normalizada
OLI	Operational Land Imager
SEBAL	Surface Energy Balance Algorithm for Land
SNIRH	Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos
SONDA	Sistema Nacional de Organização de Dados Ambientais
S-SEBI	Simplified Surface Energy Balance Index
TIRS	Thermal Infrared Sensor
TM	Thematic Mapper
TSEB	Two Source Energy Balance

LISTA DE SÍMBOLOS

c_p	Calor específico do ar a pressão constante ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$)
d_r	Quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol (UA) e a distância Terra-Sol para um dia específico
dT	Diferença de temperatura próxima da superfície (K)
ΔQF	Variação no armazenamento de energia devido a atividade fotossintética da vegetação (Wm^{-2})
ΔQV	Variação no armazenamento de calor sensível e latente (Wm^{-2})
ET	Evapotranspiração (mm)
ET_0	Evapotranspiração de referência (mm)
ET_{24h}	Evapotranspiração real diária (mm)
ETr	Evapotranspiração real (mm)
ETr,s_acum	Evapotranspiração real sazonal acumulada (mm)
FE	Fração evaporativa
G	Densidade do fluxo de calor no solo (Wm^{-2})
H	Densidade do fluxo de calor sensível (Wm^{-2})
IAF	Índice de Área Foliar
$IE_{,ANA}$	Irrigação Estimada média pela ANA (m^3/s)
$IE_{,SEBAL}$	Irrigação Estimada média pelo SEBAL (m^3/s)
I_s_acum	Irrigação sazonal acumulada
k	Constante de von Karman
k_e	Coefficiente de Extinção
$K_{1,TIRS}$	Primeira constante de radiação ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu\ m^{-1}$) específica para o sensor TIRS
$K_{1,TM}$	Primeira constante de radiação ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu\ m^{-1}$) específica para o sensor TM
$K_{2,TIRS}$	Segunda constante de radiação (K) específica para o sensor TIRS
$K_{2,TM}$	Segunda constante de radiação (K) específica para o sensor TM
k_t	Coefficiente de turbidez da atmosfera
$K_{\lambda,b}$	Irradiância espectral no topo da atmosfera ($Wm^{-2}\mu\ m^{-1}$)
$L_{\lambda i}$	Radiância espectral monocromática ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu\ m^{-1}$)
LE	Densidade do fluxo de calor latente (Wm^{-2})
ND	Número digital
P	Pressão atmosférica (kpa)

P₀	Pressão atmosférica ao nível médio do mar (kpa)
Q'E	Fluxo de calor sensível associado à advecção de vapor d'água na atmosfera (Wm ⁻²)
Q'H	Fluxo de calor sensível associado à advecção de massa na atmosfera (Wm ⁻²)
R_{,emi}	Radiação de onda longa emitida (Wm ⁻²)
R_{ah}	Resistência aerodinâmica ao transporte de calor (s m ⁻¹)
R_{atm}	Radiação de onda longa incidente (Wm ⁻²)
R_n	Saldo de radiação (Wm ⁻²)
R_{s,inst}	Radiação solar incidente (Wm ⁻²)
S	Constante solar (Wm ⁻²)
SAVI	Índice de Vegetação Ajustado para os Efeitos do Solo
T_a	Temperatura do ar à superfície (K)
T_s	Temperatura da superfície (K)
u_*	Velocidade de fricção (ms ⁻¹)
u_z	Velocidade do vento (ms ⁻¹)
W	Água precipitável (mm)
Z	Ângulo zenital solar (°)
Z_{om}	Coefficiente de rugosidade ao transporte de momentum (m)
α	Albedo da superfície
α_p	Reflectância da atmosfera
α_{sup}	Albedo da superfície
α_{toa}	Albedo planetário
ε₀	Emissividade da superfície
ε_a	Emissividade da atmosfera
ε_{NB}	Emissividade no domínio da banda termal
ρ	Massa específica de ar (kgm ⁻³)
ρ_{λi}	Reflectância monocromática
σ	Constante de Stefan-Boltzmann (Wm ⁻² K ⁻⁴)
τ_{sw}	Transmissividade atmosférica
ψ_h	Correção de estabilidade para o transporte de calor
ψ_m	Correção de estabilidade para o transporte de momentum
c_p	Calor específico do ar a pressão constante (J kg ⁻¹ K ⁻¹)

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1 Evapotranspiração: Conceito e variáveis intervenientes	4
2.2 Balanço de energia	5
2.3 Técnicas de estimativa da ET através de SR	6
2.3.1 SEBAL	7
2.4 Sensores e plataformas orbitais	9
2.4.1 Sensores TM e OLI/TIRS	9
2.4.2 Sensor MODIS	9
3. MATERIAL E MÉTODOS	10
3.1 Caracterização da Área de estudo	10
3.2 Imagens TM e OLI/TIRS	11
3.3 Imagens MODIS	13
3.4 Algoritmo SEBAL	15
3.4.1 Estimativa de Rn para as cenas do TM e OLI/TIRS	15
3.4.2 Estimativa de Rn para as cenas do MODIS	21
3.4.2.1 Downscaling da temperatura da superfície	22
3.4.3 Estimativa dos fluxos de calor no solo e de calor sensível	23
3.4.4 Estimativa da evapotranspiração real diária	27
3.5 Estimativa da evapotranspiração real sazonal e do volume de água empregado nas irrigações	27
3.6 Reconhecimento dos perímetros irrigados e estimativa do volume de água empregado nas irrigações	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
5. CONCLUSÕES	57
REFERÊNCIAS DA LITERATURA	58

INTRODUÇÃO

Um dos maiores problemas envolvidos na atividade agrícola, recai sobre o custo do elemento vital à civilização humana: a água. Sabe-se que o setor agrícola, segundo Moreira et al. (2010), é o maior consumidor de água, alcançando cerca de 69% de toda a água derivada de rios, lagos e aquíferos subterrâneos.

A ausência de um estudo do quantitativo evapotranspirante em uma área agrícola, significa negligência com a escassez dos recursos hídricos. O cenário que envolve a Bacia Hidrográfica do Submédio do Rio São Francisco (BHSRSF) e o polo de irrigação Petrolina/Juazeiro é caracterizado, de um lado, por uma grande disponibilidade de água e, por outro, um intenso crescimento urbano e econômico, o que acarreta em uma demanda crescente por água para diversos fins, tanto consumo humano, quanto industrial e agrícola.

Silva (2012) comenta que as atividades agrícolas na região ribeirinha da BHSRSF expressaram avanço no perfil econômico da região mediante implementação de agricultura irrigada em meados da década de 1970. O autor expressa ainda que a conjunção de vários fatores, tais como, o potencial dos recursos naturais, principalmente, as condições edafoclimáticas, a disponibilidade de terras e água, e a presença decisiva do Estado impulsionando os investimentos da região, constituíram a base para a transformação do aparelho produtivo local.

Porém, apesar da geração de emprego e renda na BHSRSF ser crescente com uma estimativa de 200 mil empregos gerados pela fruticultura, Silva (2012) aponta que o uso inadequado das práticas de manejo de solo e água, além da utilização indiscriminada dos insumos agrícolas (adubos, defensivos, entre outros produtos químicos) provocam alterações nas propriedades físico-químicas do solo (salinização, compactação, desequilíbrio nos teores de nutrientes, perda da matéria orgânica, diminuição da atividade microbiológica, contaminação por metais pesados e resíduos de pesticidas) e poluição dos recursos hídricos (contaminação das águas superficiais, eutrofização das fontes superficiais, lixiviação de nutrientes para os aquíferos).

A outorga de direito de uso de recursos hídricos é um dos instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos, estabelecidos no inciso III, do Art. 5º da Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Esse instrumento tem como objetivo assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso aos recursos hídricos. A fiscalização do uso de recursos hídricos atua por meio do acompanhamento, do controle, da apuração de irregularidades e infrações e a eventual determinação de retificação por parte de usuários (WARREN *et al.*, 2014).

Além do esforço para fiscalizar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso aos recursos hídricos, o poder público responsável ainda tem de fiscalizar aqueles usuários alheios ou indiferentes ao cadastro, que se encontram em condição de livre acesso dos recursos hídricos de uma bacia, uma vez que a outorga não tenha sido solicitada.

Outra função da outorga é dar suporte para a cobrança pelo uso da água, seja para captação, consumo ou diluição de algum material, o pagamento por esse recurso é de interesse da união, do Estado ou do Município responsável pela outorga da bacia hidrográfica.

Recentemente, uma nova proposta de cobrança pelo uso da água realizada pelo CBHSF foi aprovada pela Câmara Técnica de Outorga e Cobrança (CTCOB) em Brasília, que atualiza, estabelece mecanismos e sugere novos valores de cobrança pelo uso de recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio São Francisco (CBHSF, 2017). A nova proposta compromete-se a:

- Cobrar os usos dos recursos hídricos nos termos da deliberação do CBHSF N° 94, de 25 de agosto de 2017 (CBHSF, 2017), que basicamente, segue a lógica de que quem usa e polui mais os corpos de água, paga mais e quem usa e polui menos, paga menos;
- Designar que a entidade delegatária das funções deverá apresentar ao CBHSF, a cada cinco anos, uma avaliação do instrumento da cobrança pelo uso de recursos hídricos, visando, quando couber, ajustes, revisões e complementações dos mecanismos e valores e
- Regularizar, retificar ou ratificar os dados do Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos - CNARH para todos os usos na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco - BHSF, compatíveis com o instrumento da cobrança.

Nesse ponto, a água utilizada sem rigor, para irrigação de culturas, pode demarcar uma quantidade excedente àquela necessária e determinada pela outorga pertinente aquela bacia hidrográfica. Nesse contexto, a evapotranspiração (união do processo de evaporação da água em superfície e da transpiração da vegetação - ET) é uma variável fundamental para estimar a exigência hídrica das culturas, no intento de aplicar metodologias de irrigação.

Os instrumentos utilizados para a medição direta da evapotranspiração são chamados de lisímetros, que tentam retratar o mais fielmente possível as condições reais do campo, o que impõe uma série de exigências sobre essa técnica, como a instalação (cuidados para preservar as características do ambiente), tipo do cultivo e do solo e disposição espacial destes. Tais requisitos demandam rigor, tempo e dinheiro.

A técnica nominada SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), vem sendo utilizada com êxito em diversas pesquisas com o desígnio de estimar os fluxos turbulentos em

superfície e a evapotranspiração (BASTIAANSEN et al., 1998b; BASTIAANSEN, 2000; TASUMI e ALLEN, 2007; NICÁCIO, 2008 e SILVA et al., 2014).

Proposto por Bastiaanssen (1995), a técnica se baseia na informação radiativa de imagens de satélites e de poucas informações de superfície, que somadas a equações semi-empíricas estimam o fluxo de calor latente (LE) como resíduo do balanço de energia. Uma vez obtido o LE, a ET pode ser computada a partir da relação entre a energia disponível e a energia necessária para vaporizar uma unidade de água líquida.

O departamento de recursos hídricos de Idaho (IDWR), nos Estados Unidos da América (EUA), está atualmente usando dados do OLI/TIRS - Landsat 8, incorporados à técnica METRIC (*Mapping Evapotranspiration at high resolution and with Internalized Calibration*), similar ao SEBAL, para computação e mapeamento da ET e do consumo de água. Esses dados de ET são incorporados à modelos hidrológicos e utilizados nas previsões de abastecimento de água para as próximas estações de irrigação. Mais de 90% da água consumida em Idaho, é destinada à irrigação de 1,4 milhão de hectares de agricultura irrigada (IDWR, 2017). O uso da técnica em outros estados dos EUA também se faz presente, como na bacia do rio Walker em Nevada, no rio Colorado e seu afluente rio Green que compreendem Wyoming, Colorado e Utah, na bacia do rio Klamath em Oregon, entre outros (SERBINA e MILLER, 2014).

É nessa perspectiva que este trabalho tem como objetivo geral, avaliar o volume de água empregado nas áreas irrigadas do polo Petrolina/Juazeiro, com vistas a observar sua expansão entre 1987 e 2017, e sua aplicação no decurso de um ano (2015) através de imagens orbitais e do algoritmo SEBAL.

Como objetivos específicos, esta pesquisa propõe:

- Computar as componentes do balanço de energia à superfície por meio do algoritmo SEBAL, utilizando imagens orbitais dos sensores TM - Landsat 5, OLI/TIRS - Landsat 8 e MODIS – TERRA/AQUA nas áreas irrigadas do polo Petrolina/Juazeiro;
- Estimar a evapotranspiração real diária através dos sensores TM e OLI/TIRS e a evapotranspiração real sazonal através do MODIS por meio da técnica SEBAL, na área de estudo;
- Avaliar o impacto nas variáveis biofísicas da superfície albedo, índice de vegetação, saldo de radiação e temperatura, ao qual as mudanças na cobertura do solo venham a trazer no intervalo de tempo entre 1987 e 2017;
- Estimar o volume de água empregado nas irrigações no polo Petrolina/Juazeiro e
- Propor uma metodologia para reconhecimento dos perímetros irrigados por sensoriamento remoto

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Evapotranspiração: Conceito e variáveis intervenientes

A irrigação e a evapotranspiração são terminologias aplicadas a dois eventos que coexistem em um mesmo ambiente. Irrigação é a atividade designada a aplicação artificial de água, no intuito de repor a água consumida pelas plantas no processo de transpiração e evaporação, comumente chamado de evapotranspiração. Portanto, deve-se conhecer previamente o efetivo evapotranspirante, para que a aplicação da irrigação não ocorra em demasia ou insuficiência.

Para Silva (2006) o termo evapotranspiração (ET) é empregado para exprimir a transferência de vapor d'água para a atmosfera, proveniente de superfícies vegetadas, englobando duas contribuições: a evaporação da umidade existente no solo ou água e a transpiração resultante da atividade biológica dos seres vivos nesse meio.

Uma vez que a passagem de água à fase gasosa ocorre em resposta ao aumento de energia cinética das moléculas, sendo crucial uma certa quantidade de calor (o calor latente de vaporização), essa transferência possui relação intrínseca com o saldo de radiação disponível na superfície fonte, que primordialmente é produto da radiação solar que atinge a superfície.

As condições atmosféricas determinam a diferença entre a quantidade de energia que atinge o topo da atmosfera e a que atinge a superfície terrestre. Após um balanço de radiação entre o que atinge a superfície e o que é emitida por esta, resulta o saldo de radiação.

Além do saldo de radiação em superfície, existem outras variáveis que apresentam relação com a ET. O déficit da pressão parcial de vapor na atmosfera, o qual representa o quão o ar carece de vapor para atingir a saturação, pode dificultar a transferência de vapor d'água para a atmosfera em um cenário de saturação e facilitar em uma atmosfera seca, enquanto que o vento advecta o vapor d'água e impede a saturação da atmosfera circunvizinha, bem como pode gerar turbulência e ajudar para o transporte vertical do vapor d'água.

Outros fatores intervenientes na ET são as propriedades físicas da superfície fonte, como o coeficiente de reflexão da radiação incidente (albedo), que impacta no saldo de radiação, a rugosidade, que interfere na turbulência e as propriedades puramente biológicas ligadas à superfícies vegetadas, que interferem na transpiração da planta, como a espécie, a fase de desenvolvimento, a densidade, a distribuição espacial, o estado fitossanitário etc.

No âmbito agrícola, para fins de planejamento, foi estabelecido um conceito de ET sob dadas condições, denominado evapotranspiração de referência (ET_0). Segundo a FAO-56 (Allen et al., 1998), à quantidade de água transpirada a partir de uma superfície hipotética (que

se assemelha a grama), recobrando totalmente o solo, com altura uniforme de 0,12 m, apresentando resistência de 70 s m^{-1} , albedo igual a 0,23, sadia, em plena atividade vegetativa e sem sofrer restrições hídricas, se associa o termo evapotranspiração de referência. Conhecida a ET_0 , a evapotranspiração de uma determinada cultura pode ser estimada, desde que se conheça o coeficiente da cultura (K_c) e a mesma se encontre em condições padrão.

2.2 Balanço de energia

Um dos métodos mais consistentes para se estimar a evapotranspiração é o método do balanço energético, o qual se baseia no princípio da conservação de energia, com respeito aos fluxos de energia que se observam em uma determinada superfície.

Esse método resume-se em delimitar um elemento de volume da superfície, no qual os fluxos energéticos de entrada e saída possam ser computados mediante a seguinte equação (SILVA, 2006):

$$R_n + G + H + LE + Q'_H + Q'_E + \Delta Q_F + \Delta Q_V = 0 \quad (1)$$

em que, expressos em razão da densidade de fluxo de energia (Wm^{-2}), R_n é o saldo de radiação, G é o fluxo de calor sensível que ocorre no solo, H é o fluxo de calor sensível transportado para a atmosfera por turbulência, LE é o fluxo de calor latente transportado para a atmosfera devido a ascensão do vapor d'água emitido por evaporação ou evapotranspiração, Q'_H é o fluxo de calor sensível associado à advecção de massa na atmosfera, Q'_E é o fluxo de calor sensível associado à advecção de vapor d'água na atmosfera, ΔQ_F é a variação no armazenamento de energia devido a atividade fotossintética da vegetação e ΔQ_V é a variação no armazenamento de calor sensível e latente, observado no interior do elemento de volume da superfície.

Conhecidos todos os demais termos da Equação 1, LE pode ser obtido como resultado das diferenças. No entanto, a aquisição dessas variáveis não ocorre sistematicamente nas estações meteorológicas, salvo nos centros de pesquisa mais avançados e com equipamentos sofisticados. Então, surgiu a necessidade de restringir o método realizando algumas simplificações.

Algumas simplificações propostas por Gangopadhyaya et al. (1966) se mostram coerentes e aceitáveis: A atividade fotossintética da vegetação resulta em um acúmulo de energia da ordem de 1 a 2% do total da radiação solar incidente, tornando possível negligenciá-lo. O mesmo acontece com ΔQ_V . Considerando uma área sob cobertura vegetativa uniforme, os

termos relacionados à divergência (Q'_H e Q'_E) podem ser desprezados. Feitas as simplificações, o saldo energético pode ser expresso como segue:

$$R_n = LE + G + H \quad (2)$$

Algumas técnicas de sensoriamento remoto, portanto, destinam-se a estimar LE em função de R_n , G e H, uma vez que obtido o fluxo de calor latente, a evapotranspiração pode ser computada a partir da relação entre a energia disponível e a energia necessária para vaporizar uma unidade de água líquida.

R_n e G se apresentam relativamente mais simples de se calcular do que H, o maior obstáculo para se obter LE. O fluxo de calor sensível varia em resposta ao gradiente de temperatura (K) e a resistência aerodinâmica ao transporte de calor ($s\ m^{-1}$), ambos próximo da superfície. Estas duas variáveis não se encontram disponíveis sistematicamente e/ou em larga escala espacial, o que atribui às técnicas de sensoriamento remoto um importante papel a desempenhar neste contexto.

2.3 Técnicas de estimativa da ET através de SR

No que confere ao sensoriamento remoto, a praticidade em se obter dados de superfície através de um sensor orbital, e a gama crescente das aplicações que se apresentam seja no ramo das Ciências Exatas e da Terra ou até mesmo nas Ciências Sociais, são no mínimo surpreendentes.

No campo da Biofísica, a estimativa de parâmetros da superfície como albedo, emissividade e temperatura, torna possível inferir os fluxos radiativos que representam o combustível para os processos meteorológicos que ocorrem na troposfera.

O uso de sensoriamento remoto para estimar estas variáveis biofísicas se tornou possível mediante o conceito de radiância, dado como a medida, feita pelo sensor, da densidade de fluxo radiante (energia por unidade de tempo e área) que deixa um elemento de área da superfície do terreno, e que se propaga em uma direção definida por um cone elementar de um ângulo sólido contendo aquela direção, medida em $W/m^2\text{sr}$.

Dentre os algoritmos semi-empíricos mais usados para a estimativa do balanço de energia, encontram-se o algoritmo do balanço de energia para a superfície terrestre denominado de SEBAL - *Surface Energy Balance Algorithm for Land* – (BASTIAANSEN, 1995), o modelo para balanço de energia por duas fontes *Two Source Energy Balance* – (TSEB) (NORMAN et al., 1995), o algoritmo de sensoriamento remoto simples para estimar o balanço

de energia na superfície - *Simple Remote Sensing Algorithm to Estimate the Surface Energy Balance*) (S-SEBI) (ROERINK et al., 2000) e o mapeamento da evapotranspiração em alta resolução e com calibração interna (*Mapping Evapotranspiration at high resolution and with Internalized Calibration – METRIC*) (ALLEN et al., 2007).

Usualmente, essas técnicas são utilizadas sob condição de céu claro, uma vez que a nuvem atenua a radiação incidente, e interfere em todas as estimativas remotas dos parâmetros em superfície.

2.3.1 SEBAL

O algoritmo SEBAL, desenvolvido por Bastiaanssen (1995), propõe estimar a evapotranspiração através de um método semi-empírico de estimativa do LE. A ideia se baseia em obter LE como resíduo do balanço de energia.

Para a obtenção do balanço de energia, o SEBAL faz uso da informação radiativa de imagens de satélites e de poucas informações de superfície, tais como a temperatura do ar e a velocidade do vento, que são facilmente obtidas nas estações meteorológicas.

O cerne da técnica, está na metodologia empregada para o alcance do fluxo de calor sensível (componente “H” do balanço de energia), o qual se obtém a partir da seleção de pixels dito “âncoras”. Estes pixels são cruciais na obtenção do gradiente de temperatura na interface superfície-atmosfera, gradiente este que proporciona a existência do fluxo de energia. Outro aspecto importante é a determinação da resistência aerodinâmica ao transporte de calor, a qual é função da velocidade de fricção sob cada pixel, obtida segundo o perfil logarítmico da velocidade do vento.

Determinado os pixels âncoras, e adquirida a resistência aerodinâmica, deve-se seguir um processo iterativo de auto-calibração, realizando a correção para os efeitos de estabilidade atmosférica, até que se atinja o então refinado H.

O SEBAL vem sendo amplamente utilizado com êxito para indicar a evapotranspiração real com dimensão de mesoescala, em especial em áreas de cultivos agrícolas sob irrigação. Trabalhos em diversas partes do mundo ilustram que os resultados são muito consistentes (BASTIAANSEN et al., 1998b; BASTIAANSEN, 2000; WANG et al., 2005; TASUMI e ALLEN, 2007; LI e ZHAO, 2010 e SHILPAKAR et al., 2011; SILVA et al., 2015(a)).

No Brasil, inúmeros trabalhos fizeram uso do SEBAL para estimativa de componentes do balanço de energia e evapotranspiração (BEZERRA et al., 2008; NICÁCIO, 2008; SILVA et al., 2012; BRAGA, 2014; MACHADO et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2014; SILVA et al., 2014; SILVA et al., 2015(a); SILVA et al., 2016; COELHO et al., 2017).

Neste trabalho, a área de estudo comporta os Municípios de Petrolina e Lagoa Grande em Pernambuco, Juazeiro, Casa Nova, Sobradinho e Curaçá na Bahia, região que já foi alvo de pesquisas utilizando o SEBAL. Pace (2005) estimou o saldo de radiação no Perímetro Irrigado Senador Nilo Coelho, localizado entre os municípios de Juazeiro e Petrolina. O autor realizou os cálculos com e sem a utilização do Modelo de Elevação Digital, no sentido de observar se haveriam discrepâncias nas estimativas. Foram notadas algumas pequenas variações no albedo, sendo maior com o uso do MED e conseqüentemente no saldo de radiação, sendo este menor com o uso do MED.

Teixeira et al. (2009a,b) calibraram e validaram o modelo SEBAL a partir de sete estações agrometeorológicas na região semiárida da bacia do Submédio São Francisco. Os mesmos ressaltam que o SEBAL possui auto calibração para o fluxo de calor sensível, logo, o uso das equações clássicas não levará a resultados inadequados de evapotranspiração real. No mesmo trabalho, Teixeira et al. (2009a,b) estimaram a ET a produção de biomassa e produtividade da água das culturas. Os resultados apontam para uma diferença menor que 1% e 5% entre as estimativas e medições de ET do cultivo de manga (irrigado) e da vegetação nativa (caatinga), respectivamente. A produção anual por hectare é comparável com outras regiões no mundo, devido às múltiplas estações de crescimento que podem ser alcançadas dentro de um ciclo anual. Os autores elucidam também a alta produtividade da região, mas alertam quanto ao gerenciamento da irrigação, uma vez que a percolação significativa pode afetar adversamente os ambientes em termos de subida dos lençóis freáticos e retorno do fluxo de água poluída para o rio.

Nicácio (2008) utilizou imagens orbitais do TM-Landsat 5 e MODIS-TERRA para mapear os fluxos energéticos à superfície, umidade do solo e evapotranspiração real diária (ET_{24h}) nos perímetros irrigados e nos biomas Caatinga, na região de Petrolina/Juazeiro (entre os estados de Pernambuco e Bahia, no Submédio São Francisco) e Cerrado, na bacia do rio de Ondas (localizada nos municípios de Barreiras e Luís Eduardo Magalhães-BA, no médio São Francisco). A autora cita que os resultados encontrados indicaram boa concordância entre as estimativas do SEBAL utilizando o sensor TM e os dados medidos *in situ* na região de Petrolina/Juazeiro. As estimativas das variáveis com base no sensor MODIS apresentaram padrões espaciais similares aos observados com o sensor TM, e explicitaram o potencial desses dados no entendimento da evolução diária dos fluxos de calor, ressaltando os efeitos da irrigação, no entanto, com perda das nuances.

2.4 Sensores e plataformas orbitais

2.4.1 Sensores TM e OLI/TIRS

O sensor *Thematic Mapper* (TM), à bordo do satélite Landsat 5, foi lançado à órbita terrestre em março de 1984 e forneceu mais de 2,5 milhões imagens no domínio da radiação solar e terrestre do planeta Terra. Sua jornada sob a abóboda celeste perdurou durante 29 anos, encerrando suas atividades em junho de 2013.

O satélite Landsat 8 foi colocado em órbita terrestre em fevereiro de 2013 e continua em operação, transportando consigo os sensores OLI (*Operational Land Imager*) e TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) responsáveis pela geração de imagens no domínio espectral solar com a adição de uma banda pancromática, e no domínio do infravermelha termal, respectivamente.

Ambos Landsat 5 e Landsat 8 possuem órbita quase polar e heliossíncrona, numa altitude média de 705 km. As imagens geradas pelos sensores TM e OLI/TIRS contêm níveis de cinza ou intensidade do pixel, ou ainda número digital (ND) que representam a radiância espectral dos alvos, cujos valores variam de 0 a 255 (8 bits) para o TM, e de 0 a 65.535 (16 bits) para o OLI/TIRS.

2.4.2 Sensor MODIS

Em dezembro de 1999 e em maio de 2002, respectivamente, a organização americana National Aeronautics and Space Administration (NASA) colocou em órbita no planeta, os satélites TERRA e AQUA, do projeto Earth Observing System (EOS). Os satélites orbitam o planeta Terra com trajetória polar e heliossíncrona. Em fevereiro de 2000 as primeiras imagens do planeta foram obtidas, ambos os satélites continuam em operação até os dias de hoje.

Os satélites TERRA/AQUA carregam consigo o sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), projetado para satisfazer diversos estudos sobre os três campos que são foco das geociências: atmosfera, oceano e terra, com bandas de resolução espectral e espacial selecionadas para estes estudos e uma cobertura global diária (ou a cada 2 dias).

O sensor MODIS fornece imagens com resolução espacial de 250, 500 e 1000 m e possui 36 bandas espectrais. As bandas 1-7 são direcionadas para as aplicações terrestres e para estudos com nuvens; as bandas 8-16 para as observações oceânicas; e as bandas 17-19 para as medições atmosféricas. As bandas 20-36, com exceção da banda 26 (1360-1390 nm) que tem aplicações em estudos sobre nuvens cirrus especificamente, cobrem a porção termal do espectro (3660 nm a 14385 nm), no qual visa estudos acerca de temperaturas do topo da nuvem, camada de ozônio, vapor d'água atmosférico, dentre outros.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da Área de estudo

A área de estudo está localizada na Bacia Hidrográfica do Submédio do rio São Francisco – BHSRSF, que envolve o polo de irrigação Petrolina/Juazeiro, região semiárida do Brasil. Os municípios envolvidos no recorte utilizado são Petrolina e Lagoa Grande em Pernambuco, Juazeiro, Casa Nova, Sobradrinho e Curaçá na Bahia.

A Figura 1 apresenta o recorte utilizado nas imagens de satélite em composição RGB, com as bandas 6, 5 e 2 do OLI – Landsat 8, que correspondem respectivamente às bandas do infravermelho médio, infravermelho próximo, e o azul do espectro eletromagnético.

As áreas destacadas em tons de verde brilhante na Figura 1, indicam as áreas de cultivos sob prática de irrigação (vegetação saudável e vigorosa), enquanto que as árvores maduras de maior porte da vegetação nativa (caatinga), aparecem em tons de verde mais escuros. A tonalidade azul ilustra o rio São Francisco, na região submédica da bacia, com o lago Sobradrinho e sua barragem no canto central oeste da figura, um dos maiores lagos artificiais do mundo, de importância econômica e energética no âmbito nacional.

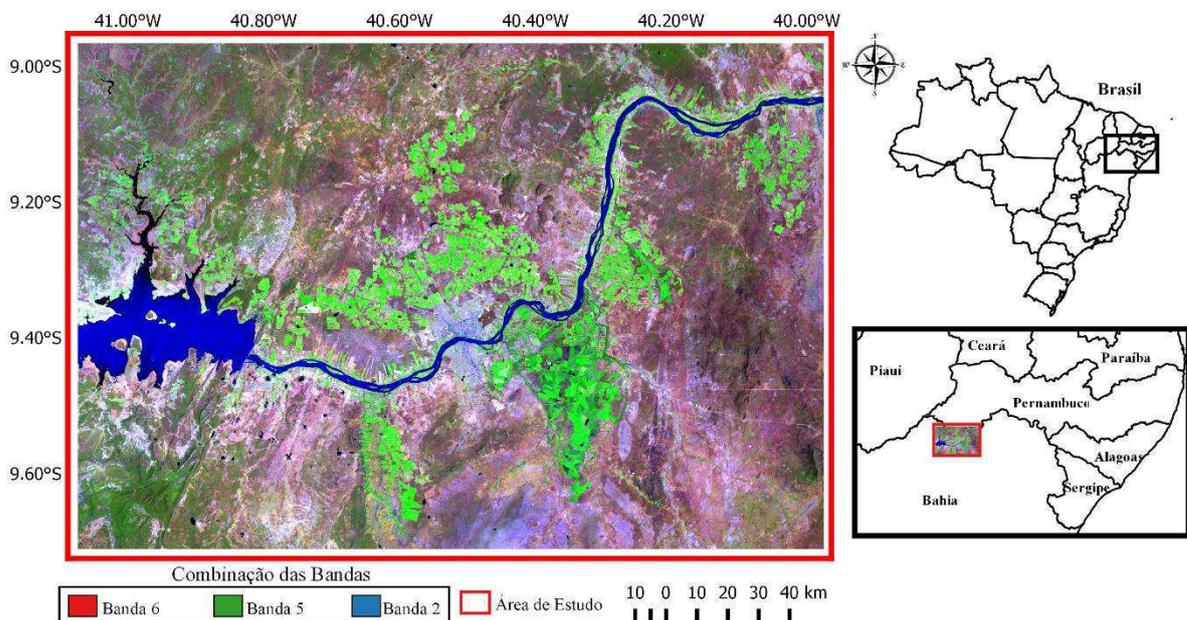


Figura 1: Localização da área de estudo: Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro

A região é demarcada por cobertura vegetal do tipo caatinga (nativa) e segundo a Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (CODEVASF,

2010), na área agrícola de Petrolina/Juazeiro diversos cultivos agrícolas são praticados, como uva, cana-de-açúcar, manga, goiaba, coco verde, mamão, melão e melancia. Alguns dos maiores perímetros irrigados são os de Curaçá, Maniçoba, Tourão, Mandacaru, Senador Nilo Coelho e Bebedouro.

Segundo o Comitê da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco - CBHSF (BARROS, 2017), nos últimos anos, a defluência mínima do reservatório de Sobradinho vem sendo reduzida gradativamente, do patamar inicial, de 1.300 m³/s, para o nível de 600 m³/s, devido à forte estiagem que atinge a bacia hidrográfica do chamado rio da integração nacional.

De acordo com o CBHSF (2018), o lago Sobradinho foi projetado com uma capacidade de 34 bilhões de m³, e encontrava-se em 2017 com apenas 4,7% da sua capacidade. O relato ilustra a falta d'água para consumo humano nas habitações próximas ao lago, o que marca o descaso das políticas públicas para com o uso da água destinada as necessidades básicas, uma vez que dezenas de m³ por segundo alimentam os cultivos agrícolas da região.

No tocante às condições atmosféricas, a estação meteorológica de Petrolina apresenta temperatura média anual do ar de 26,3 °C, com máxima igual a 33,8 °C em dezembro e mínima de 19,5 °C em julho. A média anual de precipitação é de 577,4 mm com máxima de 136,3 mm no mês de março e mínima de 2,4 mm no mês de agosto (distribuição irregular). Segundo a classificação climática de Köppen, a região apresenta clima tipo Semiárido (BSWh') com estação chuvosa (representando cerca de 80% do total anual) entre os meses de dezembro e abril.

3.2 Imagens TM e OLI/TIRS

Foram utilizadas duas imagens de 17/01/2017 dos sensores OLI e TIRS com órbita 217 e pontos 67 e 66, geradas às 12:48:33UTC sob um ângulo de elevação do Sol de 58,3° e uma distância Terra-Sol de 0,98380 UA; e duas cenas do sensor TM de 24/06/1987 às 12:12:45UTC, com ângulo de elevação do Sol de 41,0° e distância Terra-Sol de 1,03423 UA.

Uma descrição das bandas do *Thematic Mapper* do Landsat 5 e as informações inerentes às bandas dos sensores OLI e TIRS encontram-se, respectivamente, nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1: Descrição das bandas do TM do Landsat 5, com os correspondentes intervalos de comprimento de onda, coeficientes de calibração [radiância mínima – a e máxima – b para o período: antes de maio/2003 (b1), maio/2003 a abril/2007 (b2), após abril 2007(b3)] e irradiancias espectrais no topo da atmosfera ($K_{\lambda,b}$) (CHANDER et al., 2009)

Bandas	Resolução espacial (m)	Comprimento de onda (μm)	Coeficientes de calibração ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$)				$K_{\lambda,b}$ ($\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$)
			a	b1	b2	b3	
1 (azul)	30	0,452 – 0,518	-1,52	152,10	193,0	169,0	1983
2 (verde)	30	0,528 – 0,609	-2,84	296,81	365,0	333,0	1796
3 (vermelho)	30	0,626 – 0,693	-1,17	204,30	264,0	264,0	1536
4 (IV-próx.)	30	0,776 – 0,904	-1,51	206,20	221,0	221,0	1031
5 (IV-médio)	30	1,567 – 1,784	-0,37	27,19	30,2	30,2	220,0
6 (IV-termal)	120	10,45 – 12,42	1,2378	15,303	15,303	15,303	-
7 (IV-médio)	30	2,097 – 2,349	-0,15	14,38	16,5	16,0	83,44

Tabela 2: Descrição das bandas do OLI e do TIRS do Landsat 8, com os correspondentes intervalos de comprimento de onda (LANDSAT, 2013)

Bandas	Sensor	Resolução espacial (m)	Comprimento de onda (μm)
01 (azul)	OLI	30	0,43 – 0,45
02 (azul)	OLI	30	0,45 – 0,51
03 (verde)	OLI	30	0,53 – 0,59
04 (vermelho)	OLI	30	0,64 – 0,67
05 (IV-próximo)	OLI	30	0,85 – 0,88
06 (IV-médio1)	OLI	30	1,57 – 1,65
07 (IV-médio2)	OLI	30	2,11 – 2,29
08 (Pancromática)	OLI	15	0,50 – 0,68
09 (Cirrus)	OLI	30	1,36 – 1,38
10 (IV-termal1)	TIRS	100	10,60 – 11,19
11 (IV-termal2)	TIRS	100	11,50 – 12,51

3.3 Imagens MODIS

Nesta pesquisa foi feito uso de três produtos do sensor MODIS à bordo do satélite Terra, o MOD09GQ, o MOD09GA e o MOD11A1, e, quando pertinente (como será visto adiante na subseção 3.6) os respectivos produtos da plataforma Aqua (MYD09GQ, o MYD09GA e o MYD11A1) que possuem a mesma configuração. Os produtos foram utilizados para as estimativas da evapotranspiração em escala sazonal no perímetro irrigado de Petrolina/Juazeiro para o ano de 2015, como também descreve a subseção 3.6.

O MOD09GQ fornece reflectância de superfície em base diária das bandas 1 (620-670 nm) e 2 (841-876 nm) do sensor MODIS, com resolução de 250 m e projeção sinusoidal. No pré-processamento do MOD09GQ, é realizado o algoritmo do produto MOD09. Neste algoritmo, leva-se em consideração as correções atmosféricas que são utilizadas para o cálculo das reflectâncias de superfície para os canais 1 a 7. O procedimento corrige os efeitos de dispersão e absorção de gases e aerossóis, bem como efeitos de adjacência causada pela variação da cobertura da superfície (que devido à dispersão atmosférica, contaminam a informação que chega ao sensor), efeitos de acoplamento da atmosfera, e contaminação por cirrus e fazendo uso da função distribuição reflectância bidirecional (VERMOTE, 2015). A Tabela 3 ilustra as camadas do produto MOD09GQ.

Tabela 3: Especificações das camadas do produto MOD09GQ do sensor MODIS (VERMOTE, 2015)

Nome da camada	Descrição	Unidade	Fill Value	Intervalo válido	Fator multiplicativo
num_observations	Nº de observações por 250m de pixel	Nenhuma	-1	0 a 127	N/A
sur_refl_b01_1	Reflectância da superfície da banda 1	Reflectância	-28672	-100 a 16000	0,0001
sur_refl_b02_1	Reflectância da superfície da banda 2	Reflectância	-28672	-100 a 16000	0,0001
QC_250m_1	Garantia de qualidade da Reflectância de superfície 250m	Campo de bits	2995	0 a 4096	N/A
obscov_1	Cobertura da observação	Porcentagem	255	0 a 100	0,01
iobs_res_1	Nº de observações	Nenhuma	255	0 a 254	N/A
orbit_pnt_1	Indicador da órbita	Nenhuma	255	0 a 15	N/A
granule_pnt_1	Indicador da grade	Nenhuma	255	0 a 254	N/A

O produto MOD09GA apresenta informações da reflectância de superfície em base diária similar ao MOD09GQ, no entanto, foram apenas as informações do ângulo zenital solar e horário da passagem do satélite no meridiano local que interessaram ao escopo deste trabalho.

O MOD11A1 contém temperatura da superfície em base diária, possui 1 km de resolução espacial (mais precisamente 0,928 km) e projeção sinusoidal (Tabela 4). O MOD11A1 faz uso do algoritmo “*generalized split-window algorithm under clear-sky conditions*”, responsável pelo mapeamento de todos os valores de temperatura de superfície à céu claro, e uma média desses valores. Conforme a latitude cresce acima de 30°, podem existir múltiplas observações em condições de céu claro. Observações feitas por ângulos zenitais menores ou maiores, podem diferir cerca de 2K (WAN, 2015). Os arquivos contidos no produto MOD11A1 são: temperatura da superfície diária e noturna, garantia de qualidade na hora local para temperatura da superfície e emissividade das bandas 31 e 32, ângulo de visão zenital, hora local de passagem, cobertura a céu claro atributos locais e globais (metadados da imagem).

Tabela 4: Especificações das camadas do produto MOD11A1 do sensor MODIS (WAN, 2015)

Nome da camada	Descrição	Unidade	Fill Value	Intervalo válido	Fator multiplicativo	Fator aditivo
LST_Day_1km	Temperatura da Superfície diurna (Ts,d)	Kelvin	0	7500 a 65535	0,02	N/A
QC_Day	Indicador de qualidade da Ts,d	Bit Field	N/A	0 a 255	N/A	N/A
Day_view_time	Hora local da observação diurna	Hours	255	0 a 240	0,1	N/A
Day_view_angle	Ângulo zenital diurno	Degree	255	0 a 130	1,0	-65,0
LST_Night_1km	Temperatura da Superfície noturna (Ts,n)	Kelvin	0	7500 a 65635	0,02	N/A
QC_Night	Indicador de qualidade da Ts,n	Bit Field	N/A	0 a 255	N/A	N/A
Night_view_time	Hora local da observação noturna	Hours	255	0 a 240	0,1	N/A
Night_view_angle	Ângulo zenital noturno	Degree	255	0 a 130	1,0	-65
Emis_31	Emissividade da Banda 31	Nenhuma	0	1 a 255	0,002	0,49
Emis_32	Emissividade da Banda 32	Nenhuma	0	1 a 255	0,002	0,49
Clear_day_cov	N/A	Nenhuma	0	1 a 65535	0,0005	N/A
Clear_night_cov	N/A	Nenhuma	0	1 a 65535	0,0005	N/A

3.4 Algoritmo SEBAL

O SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) proporciona o cálculo da evapotranspiração com base na obtenção do balanço de energia a partir da combinação de dados multiespectrais (usualmente provindos de sensores orbitais, que captam a radiância da superfície em comprimentos de onda da radiação solar e termal) e dados obtidos através de uma estação meteorológica, como temperatura do ar, pressão atmosférica, umidade relativa e velocidade do vento.

Para a execução do SEBAL foram utilizados nesta pesquisa os dados oriundos das estações meteorológicas do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) situadas em Remanso-BA (9° 37' 32.49" S e 40° 4' 37.97" W) usada com a imagem de 24/06/1987 e a estação de Petrolina-PE (9° 23' 17,96" S e 40° 31' 23,74" W) utilizada para a cena de 17/01/2017. Para a estimativa sazonal no decorrer do ano de 2015, foram utilizados dados do Sistema Nacional de Organização de Dados Ambientais – SONDA, estação de Petrolina (09° 04' 08" S e 40° 19' 11" O).

A Eq. 3 ilustra o cálculo do fluxo de calor latente LE (W.m^{-2}) sendo obtido como resíduo do balanço entre o saldo de radiação R_n (W.m^{-2}), fluxo de calor no solo G (W.m^{-2}) e o fluxo de calor sensível H (W.m^{-2}). A obtenção de LE viabiliza a estimativa da evapotranspiração real, como será visto mais adiante, e é obtido por:

$$LE = R_n - G - H \quad (3)$$

As subseções que se seguem foram elaboradas em prol da organização e buscando o esclarecimento dos pormenores associados às distintas estimativas de R_n dos sensores TM, OLI/TIRS e MODIS.

3.4.1 Estimativa de R_n para as cenas do TM e OLI/TIRS

Nas Figuras 2 e 3 são exibidos os fluxogramas que ilustram os procedimentos ordenados e adotados para a obtenção do saldo de radiação com os satélites Landsat 5 e 8, respectivamente. Buscou-se destacar nesses fluxogramas, os passos aos quais os metadados da imagem e os dados meteorológicos são essenciais.

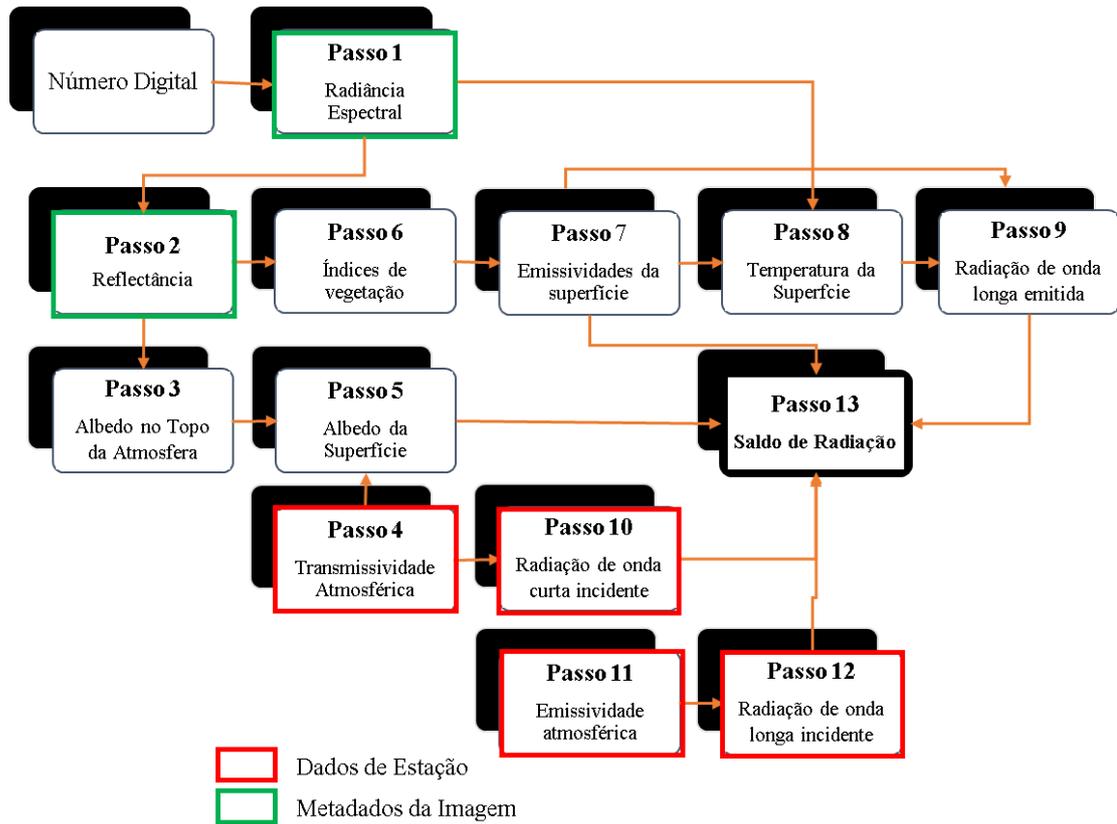


Figura 2: Fluxograma das etapas do processamento do balanço de radiação à superfície para o TM do Landsat 5

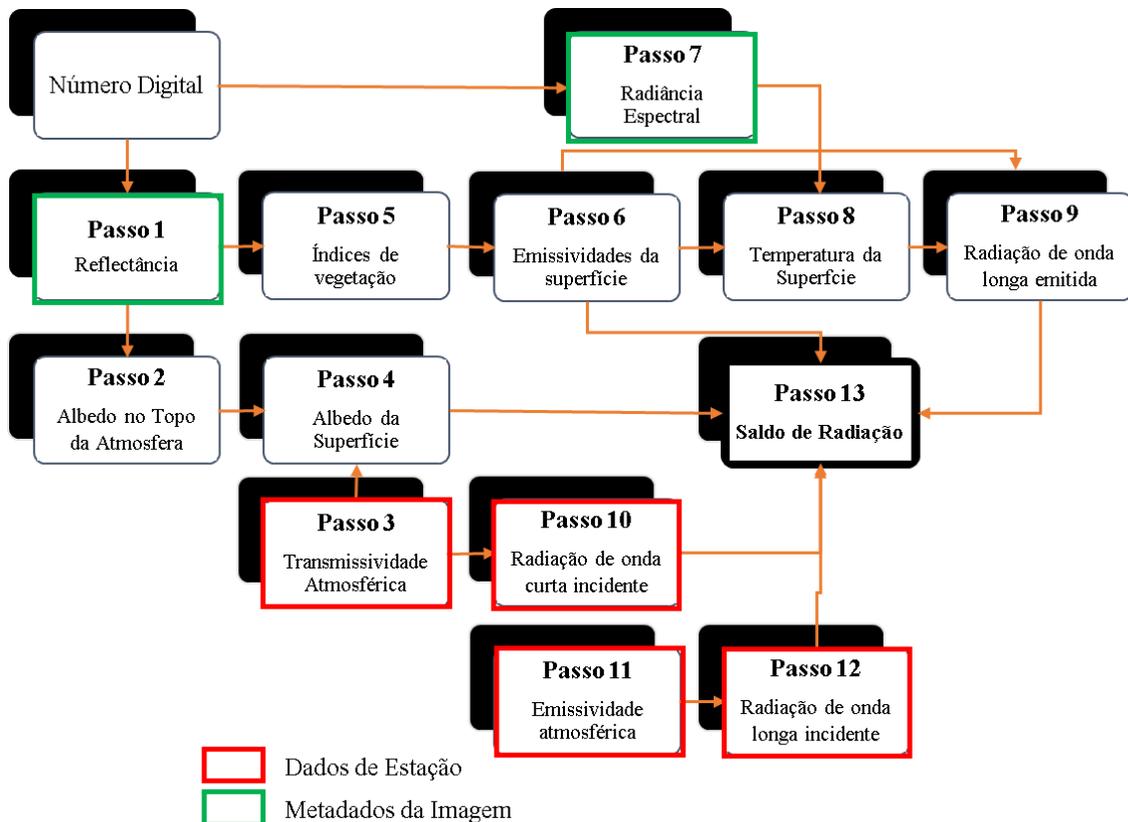


Figura 3: Fluxograma das etapas do processamento do balanço de radiação à superfície para o OLI/TIRS do Landsat 8

O balanço de radiação à superfície (R_n) é computado através do saldo de onda curta e onda longa, que em sumo, são funções da radiância espectral, refletividade e emissividades da superfície. Utilizou-se a seguinte equação (SILVA et al. 2014):

$$R_n = (1 - \alpha)R_{s,inst} - R_{emi} + \epsilon_0 R_{atm} \quad (4)$$

onde α é o albedo da superfície, $R_{s,inst}$ ($W.m^{-2}$) é a radiação de onda curta incidente, R_{emi} ($W.m^{-2}$) é a radiação de onda longa emitida por cada pixel, ϵ_0 é a emissividade da superfície e R_{atm} ($W.m^{-2}$) é a radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção da superfície.

O cômputo do albedo da superfície ou albedo corrigido aos efeitos atmosféricos (α) pode ser realizado mediante a seguinte expressão (BASTIAANSSEN et al., 1998a, 1998b)

$$\alpha = \left(\frac{\alpha_{toa} - \alpha_p}{\tau_{sw}^2} \right) \quad (5)$$

sendo que α_{toa} é o albedo planetário, α_p é a reflectância da própria atmosfera, que em várias aplicações tem sido recomendado o valor de 0,03 (ALLEN et al., 2007; BASTIAANSSEN, 2000; SILVA et al., 2011, SILVA et al., 2015(a)); τ_{sw} é a transmissividade atmosférica que conforme proposto por Allen et al. (2007) é dada por:

$$\tau_{sw} = 0,35 + 0,627 \cdot \exp \left[\frac{-0,00146P}{K_t \cos(Z)} - 0,075 \cdot \left(\frac{W}{\cos(Z)} \right)^{0,4} \right] \quad (6)$$

em que Z é o ângulo zenital solar; P é a pressão atmosférica (kPa); k_t é o coeficiente de turbidez da atmosfera, sendo $k_t = 1$ para céu claro e $k_t = 0,5$ para turbidez extrema; Z é ângulo zenital solar; W é a água precipitável (mm), calculada de acordo com a equação proposta por Garrison e Adler (1990):

$$W = 1,4 \cdot e_a \cdot \left(\frac{P}{P_0} \right) + 2,1 \quad (7)$$

em que, e_a é a pressão de vapor de saturação, P é a pressão atmosférica (hPa) e P_0 é a pressão atmosférica ao nível médio do mar (hPa).

O cômputo do albedo sem correção atmosférica (α_{toa}) é obtido pela combinação linear das reflectâncias monocromáticas:

$$\alpha_{toa,OLI} = \rho'_2 + \rho'_3 + \rho'_4 + \rho'_5 + \rho'_6 + \rho'_7 \quad (8)$$

$$\alpha_{toa,TM} = \rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4 + \rho_5 + \rho_7 \quad (9)$$

onde $\alpha_{toa,OLI}$ (BASTIAANSSEN et al., 1998a, 1998b) e $\alpha_{toa,TM}$ (SILVA et al., 2016) correspondem ao α_{toa} para o sensor OLI e TM respectivamente. $\rho'_2, \rho'_3, \rho'_4, \rho'_5, \rho'_6$ e ρ'_7 são as reflectâncias monocromáticas das bandas 2, 3, 4, 5, 6 e 7 do sensor OLI e $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4, \rho_5$ e ρ_7 são as reflectâncias monocromáticas das bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 do sensor TM.

A reflectância monocromática de cada banda ($\rho_{\lambda i}$) é dada pela razão entre o fluxo da radiação solar refletido e o fluxo da radiação solar incidente, que foi obtido respectivamente segundo as seguintes equações para o Landsat 8 e 5 (SILVA et al., 2016):

$$\rho_{\lambda i,OLI} = \frac{add_{ref,i} + Mult_{ref,i} \cdot ND_i}{\cos(Z) \cdot dr} \quad (10)$$

$$\rho_{\lambda i,TM} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda i}}{k_{\lambda i} \cdot \cos(Z) \cdot dr} \quad (11)$$

sendo que $\rho_{\lambda i,OLI}$ e $\rho_{\lambda i,TM}$ são as reflectâncias monocromáticas referentes ao OLI e TM, respectivamente, *add* e *Mult* representam os termos aditivo e multiplicativo da reflectância para cada banda, extraídos do metadados de cada imagem, assim como o ângulo de elevação (E); ND é o número digital de cada pixel da imagem (que varia entre 0 e 65365); $k_{\lambda i}$ é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$, Tabela 1); d_r é o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol, r_0 (UA), e a distância Terra-Sol, r (UA), em dado dia do ano (DOA); r foi extraída do metadados da imagem.

Para a determinação da radiância espectral monocromática $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ do sensor OLI/TIRS ($L_{\lambda i,OLI/TIRS}$), foram usados os termos aditivo ($add_{rad,i}$) e multiplicativo ($Mult_{rad,i}$) do grupo da radiância, também extraídos do metadados da imagem:

$$L_{\lambda i,OLI/TIRS} = add_{rad,i} + Mult_{rad,i} \cdot ND_i \quad (12)$$

$$L_{\lambda i,TM} = a_i + \left(\frac{b_i - a_i}{255} \right) ND_i \quad (13)$$

onde $L_{\lambda_i, TM}$ ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$) é a radiância espectral monocromática do sensor TM; a_i e b_i são as radiâncias espectrais mínimas e máximas ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$, Tabela 1) para cada banda; ND é a intensidade do pixel (número digital – número inteiro de 0 a 255 para o TM e 0 a 65535 para o OLI/TIRS); e i corresponde às bandas (1, 2, ... e 7) do TM e (2, 3, ... 7 e 10) do OLI/TIRS.

A radiação de onda curta incidente ($R_{s,inst}$) é o fluxo de radiação solar direta e difusa que atinge a superfície terrestre, que para condição de céu claro é dada pela seguinte expressão (ALLEN et al., 2007):

$$R_{s,inst} = S \cdot \cos(z) \cdot dr \cdot \tau_{sw} \quad (14)$$

em que S é a constante solar (1367 Wm^{-2}) e τ_{sw} é a transmissividade atmosférica.

A radiação de onda longa emitida pela superfície (R_{emi}) é obtida através da equação de Stefan-Boltzmann:

$$R_{emi} = \epsilon_0 \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (15)$$

sendo que ϵ_0 é a emissividade de cada pixel, σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$) e T_s é a temperatura da superfície (K).

Para a obtenção da temperatura da superfície ($T_{s,TIRS}$ para o sensor TIRS e $T_{s,TM}$ para o sensor TM) são utilizadas a radiância ($L_{\lambda_{10}}$ para o TIRS, L_{λ_6} para o TM) e a emissividade (ϵ_{NB}) no domínio espectral da banda termal. Dessa forma, obtém-se a temperatura da superfície (K) com dados do TIRS pela seguinte expressão:

$$T_{s,TIRS} = \frac{K_{2,TIRS}}{\ln\left(\frac{\epsilon_{NB} \cdot K_{1,TIRS}}{L_{\lambda,10} - 0,29} + 1\right)} \quad (16)$$

Onde $K_{1,TIRS} = 774,89 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ e $K_{2,TIRS} = 774,89 \cdot 1321,08 \text{ K}$ correspondem a primeira e segunda constantes de radiação, específicas para o sensor TIRS (neste trabalho, banda 10) disponíveis no metadados da imagem, $L_{\lambda,10}$ é a Radiância espectral da banda termal (banda 10) e $0,29 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ é o coeficiente de calibração da radiância espectral monocromática $L_{\lambda,10}$ adotado pela USGS (2013). Para o TM se obtém a $T_{s,TM}$ pela seguinte expressão:

$$T_{s,TM} = \frac{K_{2,TM}}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{NB} \cdot K_{1,TM}}{L_{\lambda,6}} + 1\right)} \quad (17)$$

em que $K_{1,TM} = 607,76 \text{ Wm}^2\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ e $K_{2,TM} = 1260,56 \text{ K}$ correspondem a primeira e segunda constantes de radiação, específicas para o sensor TM (banda 6) e $L_{\lambda,6}$ é a Radiância espectral da banda termal (banda 6)

As emissividades ε_{NB} e ε_0 foram estimadas com base em parametrizações obtidas como função do Índice de Área Foliar (IAF) (ALLEN et al., 2007):

$$\varepsilon_{NB} = 0,97 + 0,0033IAF \quad (18)$$

$$\varepsilon_0 = 0,95 + 0,011IAF \quad (19)$$

O Índice de Área Foliar (IAF) foi parametrizado por Tasumi (2003):

$$IAF = -\frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (20)$$

sendo que SAVI é o Índice de Vegetação Ajustado para os Efeitos do Solo (Soil Adjusted Vegetation Index - SAVI):

$$SAVI = \frac{(1 + L) \cdot (\rho_{IV} - \rho_V)}{(L + \rho_{IV} + \rho_V)} \quad (21)$$

onde o fator L é uma função do tipo de solo, considerado neste estudo como $L = 0,1$, ρ_{IV} e ρ_V são, respectivamente, as reflectâncias correspondentes ao infravermelho próximo e ao vermelho da radiação solar (bandas 4 e 3 para o Landsat 5 e bandas 5 e 4 para o Landsat 8).

A radiação de onda longa incidente emitida pela atmosfera na direção da superfície (R_{atm}), pode ser computada pela equação de Stefan-Boltzmann:

$$R_{atm} = \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_a^4 \quad (22)$$

em que ε_a é a emissividade atmosférica obtida por: $\varepsilon_a = 0,625 \cdot \left(\frac{e_a}{T_a}\right)^{0,131}$ (DUARTE et al., 2006), e_a é a pressão de vapor (Pa), σ é a constante de Stefan-Boltzmann e T_a é a temperatura

do ar à superfície (K). A fórmula para estimativa da ε_a proposta por Duarte et al. (2006) foi utilizada, pois segundo Silva et al. (2015b) é atualmente a mais acurada para estimativa da R_{atm} .

3.4.2 Estimativa de R_n para as cenas do MODIS

Na Figura 4 é exibido o fluxograma que ilustra os procedimentos ordenados e adotados para a obtenção do saldo de radiação com o MODIS – TERRA/AQUA.

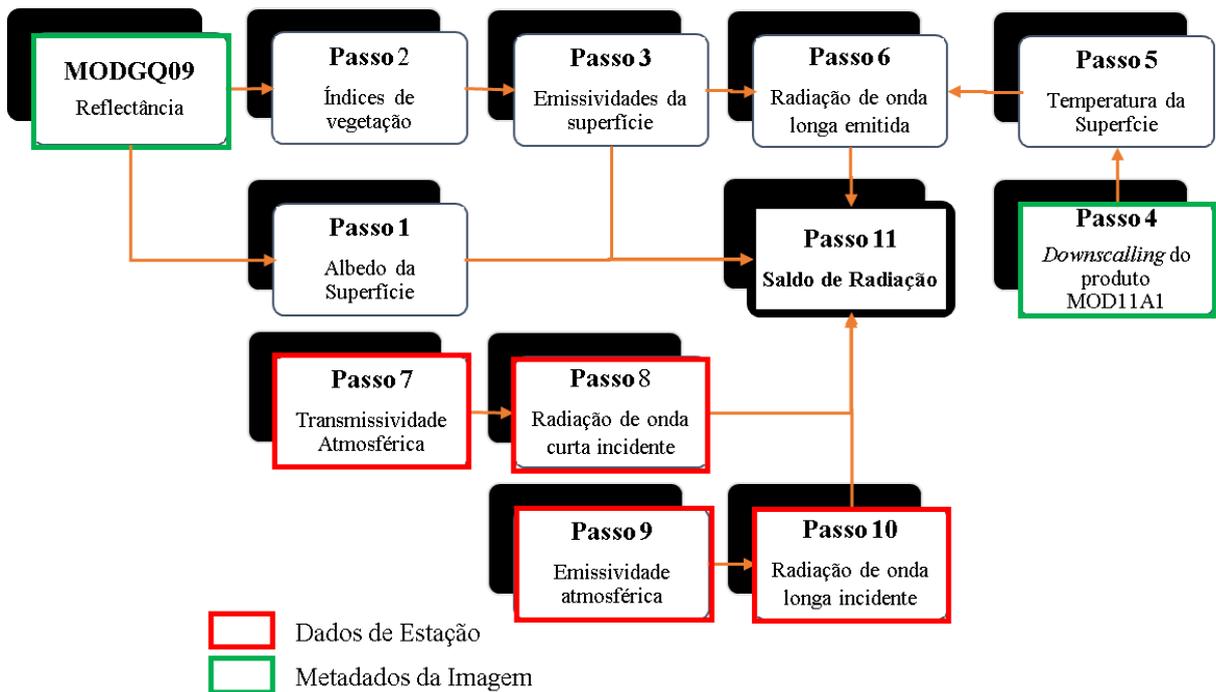


Figura 4: Fluxograma das etapas do processamento do balanço de radiação à superfície para o MODIS

Como pode ser visto na Figura 4, não se faz necessário realizar a calibração radiométrica ou o cálculo da reflectância, uma vez que o passo 1 consiste em calcular o albedo em superfície. Tendo sido obtida a temperatura da superfície por meio do produto MOD11A1, não foram calculadas a radiação ou a emissividade da superfície no domínio termal. Entretanto, visando um melhor grau de detalhamento da superfície, a resolução da imagem do MOD11A1 foi aprimorada para 250 m, segundo um procedimento de *downscaling*, detalhado na subseção seguinte.

Demais procedimentos foram realizados segundo a mesma metodologia empregada nas cenas do TM e do OLI/TIRS, uma vez que independem das características ímpares de cada sensor.

O cômputo do albedo da superfície (α) com o MODIS foi realizado mediante a seguinte expressão:

$$\alpha = a + b \cdot r_1 + c \cdot r_2 \quad (23)$$

sendo que r_1 e r_2 são as reflectâncias das bandas 1 e 2 do sensor MODIS, adquiridas através do produto MOD09GQ e a , b e c são os coeficientes de regressão obtidos por Teixeira et al. (2013) para o Semiárido brasileiro (na mesma área de interesse desta pesquisa). Os coeficientes incluem uma correção atmosférica e são respectivamente 0,08, 0,41 e 0,14.

3.4.2.1 *Downscaling* da temperatura da superfície

O método conhecido como *downscaling*, ou desagregação dos pixels, é um procedimento que visa melhorar a resolução espacial da imagem, na tentativa de expressar a superfície com mais detalhes podendo observar melhor a descontinuidade da superfície (WARREN, 2011).

A Figura 5 exhibe em detalhes um fluxograma elaborado segundo as técnicas utilizadas por Kustas et al. (2003) e Warren (2011), visando melhorar a resolução espacial da temperatura da superfície (T_s) do produto MOD11A1. Neste produto, a resolução se encontra com aproximadamente 1 km, logo, utilizando uma regressão polinomial de grau 2, se pretende transformar essa resolução para aproximadamente 250 m, utilizando o NDVI derivado da reflectância das bandas 1 e 2 do sensor MODIS (contidas no produto MOD09GQ).

Dispondo de um mapa mais detalhado da T_s , tanto o saldo de radiação, quanto os demais procedimentos (evapotranspiração e obtenção da lâmina d'água utilizada para irrigação) tendem a representar mais fielmente as reais características da superfície. Outro ponto importante em melhorar a resolução dessa variável, está na realização do recorte das áreas irrigadas, (procedimento detalhado na subseção 3.6) pois quanto menores os pixels das áreas de interesse, mais exato será o recorte, evitando a inclusão de áreas que não são do interesse.

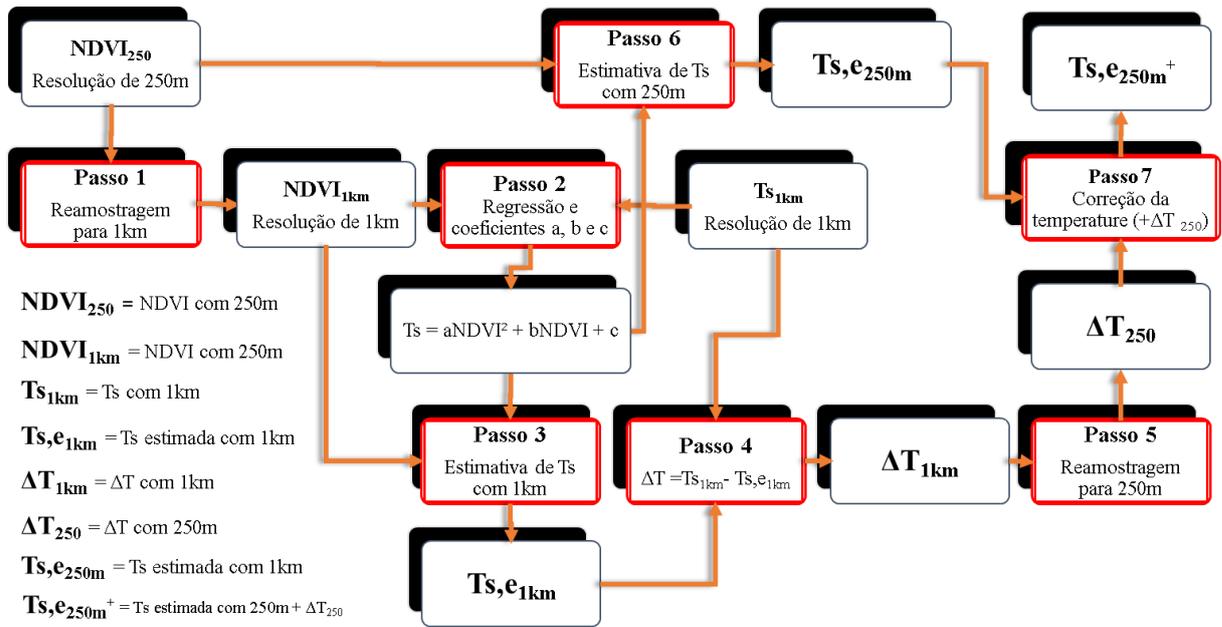


Figura 5: Fluxograma das etapas do downscaling realizado no mapa de temperatura de superfície

3.4.3 Estimativa dos fluxos de calor no solo e de calor sensível

A densidade do fluxo de calor no solo G (Wm^{-2}) pode ser obtida segundo equação empírica desenvolvida por Bastiaanssen (2000), que representa valores próximos ao meio-dia:

$$G = [T_s(0,0038 + 0,0074 \cdot \alpha) \cdot (1 - 0,98 \cdot NDVI^4)]R_n \quad (24)$$

onde T_s é a temperatura da superfície ($^{\circ}C$), α é o albedo da superfície e NDVI é o índice de vegetação da diferença normalizada.

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI) é obtido através da razão entre a diferença das refletividades do infravermelho próximo e do vermelho, pela soma das mesmas (ALLEN et al., 2007):

$$NDVI = \frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + \rho_V} \quad (25)$$

No cálculo da densidade do fluxo de calor sensível (H) foi utilizada a equação aerodinâmica clássica (Farah e Bastiaanssen, 2001) através de um procedimento iterativo (Bastiaanssen et al., 1998) ilustrado na Figura 6. Assume-se a condição de estabilidade neutra para a atmosfera para calcular H a partir da seguinte equação:

$$H = \rho C_p \frac{dT}{r_{ah}} \quad (26)$$

em que ρ é a massa específica de ar (kgm^{-3}); c_p é o calor específico do ar a pressão constante ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$); dT representa a diferença de temperatura próxima da superfície (K); e r_{ah} é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor (sm^{-1}) entre duas alturas próximas da superfície ($z_1 = 0,1 \text{ m}$ e $z_2 = 2,00 \text{ m}$).

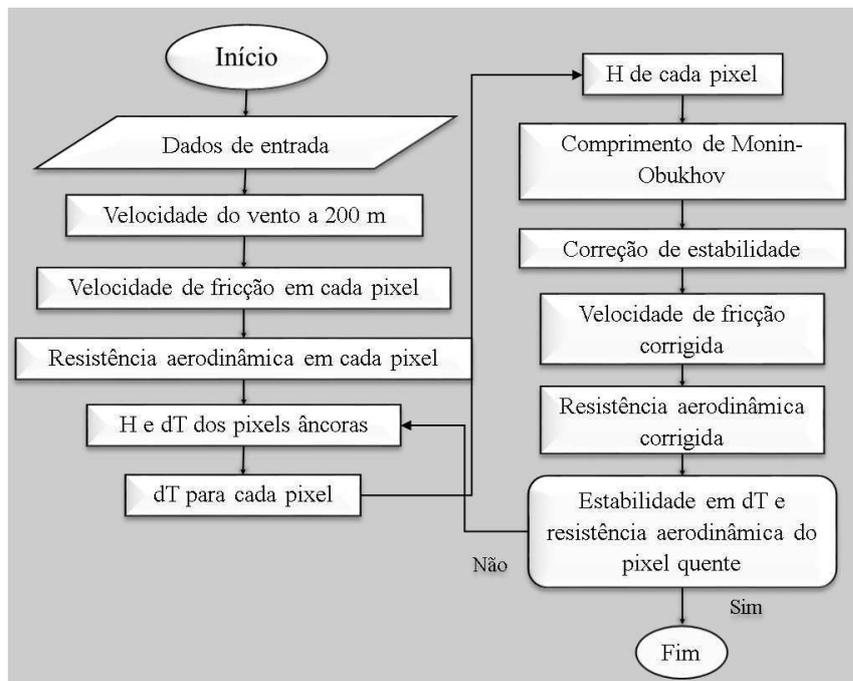


Figura 6: Fluxograma do processo iterativo de obtenção do fluxo de calor sensível – H

Fonte: Braga, 2014, adaptado pelo Autor.

Para calcular o r_{ah} , é necessário obter a velocidade de fricção do vento para cada pixel, como se observa na Equação 27 (Allen et al., 2007; Bastiaanssen et al., 2005):

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)}{u_* \cdot k} \quad (27)$$

sendo que Z_2 e Z_1 são as alturas 2,0 m e 0,1 m acima da superfície, u_* é a velocidade de fricção e k é a constante de von Karman (0,41).

O processo para obtenção da velocidade de fricção em cada pixel, parte do cálculo dessa velocidade no nível e no alcance da estação meteorológica da área de estudo:

$$u_* = \frac{ku_z}{\ln\left(\frac{Z}{Z_{0mw}}\right)} \quad (28)$$

onde a velocidade do vento (u_z) (ms^{-1}) é medida numa estação meteorológica dentro da área de estudo, Z representa a altura da medição e Z_{0mw} é o coeficiente de rugosidade ao transporte de momentum no ponto de medição ($Z_{0mw} = 0,12h$, em que h é a altura da vegetação também no ponto de medição)

Supõe-se que há uma altura na qual os efeitos da rugosidade da superfície são desprezíveis, conhecida como *blending height*, e portanto, a velocidade do vento a essa altura (u_{200}) pode ser considerada constante na área de estudo e calculada pela expressão:

$$u_{200} = u_* \frac{\ln\left(\frac{200}{Z_{0mw}}\right)}{k} \quad (29)$$

Dado este pressuposto, a velocidade de fricção (u_*) em cada pixel pode ser determinada da seguinte forma (Bastiaanssen et al., 2005; Allen et al., 2007:):

$$u_* = \frac{ku_{200}}{\ln\left(\frac{200}{Z_{0m}}\right)} \quad (30)$$

em que Z_{0m} (m) é determinado pixel a pixel com base no SAVI, de acordo com Bastiaanssen (2000). Uma vez obtido u_* , o próximo passo é a determinação de r_{ah} , na Equação 27.

Para calcular dT (diferença de temperatura próxima da superfície), uma relação linear entre T_s e dT deve ser determinada (isto é, $dT = a + b T_s$), que pode ser realizada supondo que para o pixel âncora quente, $LE = 0$ e para o pixel âncora frio, $H = 0$ (Bastiaanssen et al., 1998). De acordo com a equação do balanço energético, dT no pixel quente é determinado da seguinte forma:

$$dT_{hot} = \frac{(Rn - G) \cdot r_{ah,hot}}{\rho \cdot c_p} = a + bT_{s,hot} \quad (31)$$

sendo que Rn , G , $r_{ah, hot}$ e $T_{s,hot}$ são o saldo de radiação instantâneo (Wm^{-2}), a densidade do fluxo de calor do solo (Wm^{-2}), a resistência aerodinâmica ao transporte de calor (sm^{-1}) e a

temperatura da superfície terrestre ° C), respectivamente, no pixel quente. No pixel frio, dT é determinado como se segue:

$$dT_{\text{cold}} = 0 = a + b \cdot T_{s,\text{cold}} \quad (32)$$

onde $T_{s,\text{cold}}$ é a temperatura da superfície terrestre (°C) no pixel frio. Em seguida, a e b podem então ser obtidos ao se resolver o sistema formado pelas equações (31) e (32), e H pode ser calculado para cada pixel da área selecionada, pois $dT = a + b T_s$.

No entanto, este método propõe o cálculo de H mediante uma condição inicial de estabilidade neutra. Usando um procedimento iterativo, foi identificada a condição de estabilidade a partir do comprimento de Monin-Obukhov (L) (Bastiaanssen et al., 1998). Quando $L < 0$, a camada limite inferior atmosférica é instável, e quando $L > 0$, a camada limite atmosférica inferior é estável.

Seguindo o procedimento iterativo, um valor corrigido para u^* é calculado da seguinte forma (Allen et al., 2007; Bastiaanssen et al., 2005):

$$u_* = \frac{u_{200} \cdot k}{\ln\left(\frac{200}{Z_{0m}}\right) - \Psi_{m(200m)}} \quad (33)$$

em que $\Psi_{m(200m)}$ é a correção de estabilidade para o transporte de momentum a 200 m. O próximo passo é o cômputo de um valor corrigido para r_{ah} :

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right) - \Psi_{h(Z_2)} + \Psi_{h(Z_1)}}{u_* k} \quad (34)$$

sendo que $\Psi_{h(Z_2)}$ e $\Psi_{h(Z_1)}$ são as correções de estabilidade para o transporte de calor nas alturas Z_2 e Z_1 (Bastiaanssen et al., 2005). O procedimento iterativo estabiliza quando a diferença entre os dois últimos valores de r_{ah} é menor que 0,01.

Apesar da metodologia contemplar apenas dias de céu claro (por diversos fatores que prejudicam o cômputo das variáveis biofísicas da superfície, como a radiação do topo das nuvens, efeitos de sombra e instabilidade atmosférica na camada limite planetária), o método proporciona o cálculo das variáveis em ampla escala, com grau de detalhamento a depender da resolução do sensor.

3.4.4 Estimativa da evapotranspiração real diária

Tendo resolvido o balanço de energia em superfície, a conversão da densidade do fluxo de calor latente instantâneo em evapotranspiração real diária (ET_{24h}), é possível mediante o conceito da Fração Evaporativa instantânea (FE_i), que é a razão entre a energia latente e a energia disponível ao nível da superfície ($Rn-G$), conforme a expressão.

$$FE_i = \frac{LE}{Rn - G} \quad (35)$$

De acordo com o SEBAL, a FE_i se conserva ao longo do dia, logo, $FE_i = FE_{24h}$, o que torna possível extrapolar a evapotranspiração real instantânea para diária. A evapotranspiração diária é, então, dada por:

$$ET_{24h} = 0,035 \cdot FE_i \cdot Rn_{24h} \quad (36)$$

onde 0,035 é a razão entre o número de segundos de um dia (86400s) e a energia necessária para vaporizar uma unidade de água líquida ($2,45 \text{ MJkg}^{-1}$) e Rn_{24h} é o saldo de radiação diário (W.m^{-2}), obtido como:

$$Rn_{24h} = Rs_{24h}(1 - \alpha) - 110 \cdot \tau_{sw,24h} \quad (37)$$

em que, Rs_{24h} , α e $\tau_{sw,24h}$ são respectivamente a radiação solar diária incidente (W.m^{-2}), albedo da superfície e transmitância atmosférica média diária, obtida como a razão entre a radiação solar global diária medida [$Rs_{24h} \text{ MJ m}^{-2}$] e a radiação solar diária incidente no topo da atmosfera [$Rs_{toa} \text{ (MJ m}^{-2})$].

3.5 Estimativa da evapotranspiração real sazonal e do volume de água empregado nas irrigações

A evapotranspiração real sazonal acumulada – E_{Tr,s_acum} foi definida como a evapotranspiração real que representa os primeiros 15 dias ou os últimos dias do mês em questão (13 para o caso de fevereiro, 15 para o caso de meses com 30 dias e 16 para o caso de meses com 31 dias) acumulada de toda a área irrigada. Para tanto, foi escolhido o sensor MODIS devido a sua resolução temporal ser de um dia. O ano de 2015 foi utilizado devido a

disponibilidade de imagens com baixa cobertura de nuvens, o que possibilita um acompanhamento da evapotranspiração do perímetro irrigado no decurso de um ano.

Para sua obtenção, seguiu-se o método proposto por Silva et al. (2012) em que assume-se que a razão entre a ETr (Evapotranspiração real) diária de cada pixel da área de estudo, obtidos com base no SEBAL, e a evapotranspiração de referência diária – ETo,24h (calculada com base nos dados de superfície) é constante para o período em considerado. Por último, a ETr,s_acum compreende o produto do mapa de ETr,24h/ETo,24h pela ETo,s, sendo ETo,s obtido pelo somatório da evapotranspiração de referência diária do período em questão.

Os dados para obtenção da evapotranspiração de referência segundo o método FAO-56 de Penman-Monteith (Allen et al., 1998) foram obtidos na estação automática do projeto SONDA, localizada em Petrolina-PE. Os dados são os valores diários de temperaturas máxima e mínima, umidades relativas do ar máxima e mínima, pressão atmosférica média diária, velocidade do vento e radiação solar global diária.

Nas ocasiões em que não havia imagens do MODIS disponíveis, foram feitas interpolações entre os valores mais próximos, admitindo uma tendência linear entre esses dois períodos. As interpolações dos dias disponíveis ocorreram como ilustra a Tabela 5

Tabela 5: Imagens interpoladas (DOA) e interpolação (DOA) para os períodos em que não havia imagens do MODIS disponíveis

Imagens interpoladas	Interpolação
41/63	53
63/73	67
73/93	82
107/167	131
107/167	141
107/167	161
167/200	192

3.6 Reconhecimento dos perímetros irrigados e estimativa do volume de água empregado nas irrigações

Utilizando diferentes combinações de bandas, é possível detectar diferenças nas características do solo e da vegetação. Sabe-se que os pixels de uma imagem que contêm vegetação densa, tendem a refletir mais energia na faixa espectral do verde e do infravermelho

próximo, enquanto absorvem no vermelho, azul e infravermelho médio. Segundo Leslie et al. (2017) altos níveis de clorofila na vegetação tendem a refletir ainda mais no intervalo do infravermelho próximo, ao passo que declínios sutis nessa reflectância podem ajudar a detectar o stress da planta, mesmo se o verde visível da folha parecer inalterado.

Devido a essa assinatura espectral da vegetação, a combinação RGB das respectivas bandas 4, 5 e 1 do TM e 5, 6 e 2 do OLI é comumente usada para a visualização das parcelas irrigadas em verde incandescente (LESLIE et al., 2017).

Logo, afim de individualizar as parcelas irrigadas da imagem de satélite, esta pesquisa propõe um método para a realização da classificação da imagem, o qual é baseado na diferença entre a Reflectância do infravermelho próximo, R_{IVP} (banda 4 do TM e 5 do OLI) e do infravermelho médio, R_{IVM} (banda 5 do TM e 6 do OLI).

Admitindo que se a diferença entre R_{IVP} e R_{IVM} for igual ou superior a 0,09 (valor de corte observado), então trata-se de uma parcela irrigada. Dessa forma, a seguinte condição foi utilizada:

Se $R_{IVP} - R_{IVM} \geq 0,09$, seja 1

Se $R_{IVP} - R_{IVM} < 0,09$, seja 2

Se $NDVI < 0$, seja -1

Ao final da classificação, os pixels que contém o valor -1 são corpos d'água, como ilustra o NDVI com base na assinatura espectral dos mesmos, os pixels quem contém o valor 1 são as áreas irrigadas e os demais tipos de cobertura do solo expressam agora o valor 2.

Após a classificação da imagem, foi criado um arquivo em pontos vetoriais (shapefile), a partir do qual foi possível realizar recortes das áreas irrigadas das imagens de satélite.

Objetivando estimar o volume de água empregado nas irrigações para um determinado período, estabelecido na estimativa da evapotranspiração real sazonal, assume-se que a partir dos sistemas de irrigação típicos da área em estudo (predominantemente por microirrigação mas também, irrigação por aspersão convencional) a eficiência no uso da água pelo sistema é de 80% (ANA, 2017a). Partindo deste pressuposto, a irrigação sazonal acumulada de toda a área dos cultivos (I_{s_acum}) foi considerada igual ao quociente entre a E_{Tr,s_acum} e a eficiência média dos sistemas de irrigação empregados na área de estudo (0,8).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados geométricos e meteorológicos que possibilitaram a execução do SEBAL foram dispostos na Tabela 6. O ângulo de Elevação utilizado foi o da imagem com órbita 217 e ponto 67, pois abrange a maior parte do recorte. Os dados meteorológicos foram coletados das estações meteorológicas do INMET, uma situada em Remanso-BA (9° 37' 32.49" S e 40° 4' 37.97" W) no horário 13 UTM utilizada para o algoritmo de 24/06/1987 e a outra em Petrolina (9° 23' 17.96" S e 40° 31' 23.74" W) no horário 13 UTM, para o dia 17/01/2017.

Tabela 6: Hora (UTC) ângulo de elevação do Sol, E (°); quadrado do inverso da distância relativa Terra-Sol, dr (adimensional); cosseno do ângulo zenital solar, cos Z (adimensional); temperatura do ar, Ta (°C); pressão atmosférica, Pa (kPa); umidade relativa, UR (%); velocidade do vento, v (m/s²); transmissividade atmosférica, τ_{sw} (adimensional) e radiação solar global instantânea, Rs (W.m⁻²) na passagem dos satélites Landsat 5 e 8 no meridiano local para os dias selecionados

Data	Hora	E	dr	Cos Z	Ta	Pa	UR	v	τ_{sw}	Rs
24/06/1987	12:13:10	40,5	0,967	0,649	26,4	97,1	63,2	3,6	0,703	603.2
17/01/2017	12:48:33	58,5	1,003	0,853	28,3	97,1	42,2	4,2	0,749	902.4

A τ_{sw} varia em função da Ta, Pa e UR como visto na Eq. 06, mas como a pressão atmosférica foi a mesma para os dois dias, a variabilidade da τ_{sw} está relacionada apenas a Ta e UR. Fisicamente, a contribuição de Ta para a τ_{sw} é superior à da UR, no entanto, como a UR estava muito baixa na imagem de 2017, a τ_{sw} foi maior para esta cena, o que somado às contribuições de dr (distância Terra-Sol estava abaixo da média) e do Cos Z, resultou em uma radiação solar instantânea incidente no nível da superfície cerca de 50% superior em relação ao instante de geração da imagem do ano de 1987.

No que diz respeito a radiação solar global diária, que impacta mais diretamente na ET_{24h}, como será visto adiante, os dados foram muito próximos (diferença de 1 MJ.m⁻²) como mostra a Tabela 7. Entretanto, fazendo uma análise dimensional da Eq. 37, observa-se que a radiação global diária é o termo com maior contribuição, no qual uma diferença de 1 MJ.m⁻² no cálculo do saldo de radiação diária, é significativa mesmo para um albedo 50% maior (lembrando que quanto maior o albedo, menor o Rn), o que garante um Rn_{24h} maior para a cena do dia 17/01/2017.

Tabela 7: Radiação solar diária no topo da atmosfera, R_{Stoa} (MJ.m⁻²); radiação solar global diária, R_{S24h} (MJ.m⁻²); transmissividade atmosférica diária, τ_{sw24h} (adimensional) na passagem dos satélites Landsat 5 e 8 no meridiano local para os dias selecionados

Data	R_{Stoa}	R_{S24h}	τ_{sw24h}
24/06/1987	29.3	20.3	0.693
17/01/2017	39.4	21.5	0.545

Ao que indica a estação de Remanso-BA, durante o primeiro semestre de 1987, ocorreram chuvas moderadas na região (87% da normal climatológica da estação), apesar de que nos 90 dias que antecederam a data da passagem do satélite, a precipitação ter sido de apenas 34 mm.

Nos 5 meses que antecederam a data da imagem de 2017 a estação de Petrolina-PE registrou pouquíssimas chuvas (apenas 14% da normal climatológica). Este período seco registrado no início de 2017 foi produto das sucessivas secas que vêm ocorrendo no Nordeste brasileiro desde 2012, como apontado por Marengo *et al.* (2013) e Marengo *et al.* (2016). Estes períodos, como bem se sabe, impactam de forma negativa na densidade da vegetação nativa, que depende das chuvas para o desenvolvimento.

A Figura 7 ilustra uma combinação RGB das bandas reflectivas dos sensores TM (bandas 5, 4 e 1) na Figura 7(a) e OLI (bandas 6, 5 e 2) na Figura 7(b), semelhante a Figura 1. Esta combinação possibilita identificar as áreas irrigadas da cena, com um destaque em verde mais claro.

Extraindo as informações das imagens da Figura 7, foi possível calcular a área irrigada total para ambas as cenas. Em 1987 (Figura 7(a)), a área irrigada total era de 203,7 km². Como explorado anteriormente, a área irrigada, segundo a CODEVASF (2010) era de 441,4 km², no entanto, segundo a Figura 7(b), em 2017 a área irrigada total é de 730,89 km², o que indica que nos dias atuais, os cultivos irrigados no polo Petrolina-Juazeiro quase quadruplicaram em extensão, se comparados a 1987.

A Figura 8(b) mostra um recorte utilizado como exemplo para observar a capacidade de identificação das áreas irrigadas. A Figura 8(c) mostra como o método de individualização das parcelas irrigadas proposto nesta pesquisa (através do método da reflectância das bandas 5 e 6 do OLI) comportou-se de forma satisfatória neste processo de distinção.

Silva et al. (2012) propuseram uma técnica para distinção das áreas irrigadas, com base nos pixels que apresentassem NDVI superior a 0,4. A Figura 8(d) ilustra que esse pressuposto é satisfatório para o exemplo em questão, apresentando, inclusive, similaridade com a proposta desta pesquisa (Figura 8(c)).

Logo, é possível notar a capacidade de diferenciação notável que ambas as técnicas apresentam. Neste recorte da superfície, as parcelas irrigadas foram diferenciadas das áreas com solo exposto com exatidão, estando ambos os métodos praticamente restritos à resolução do sensor.

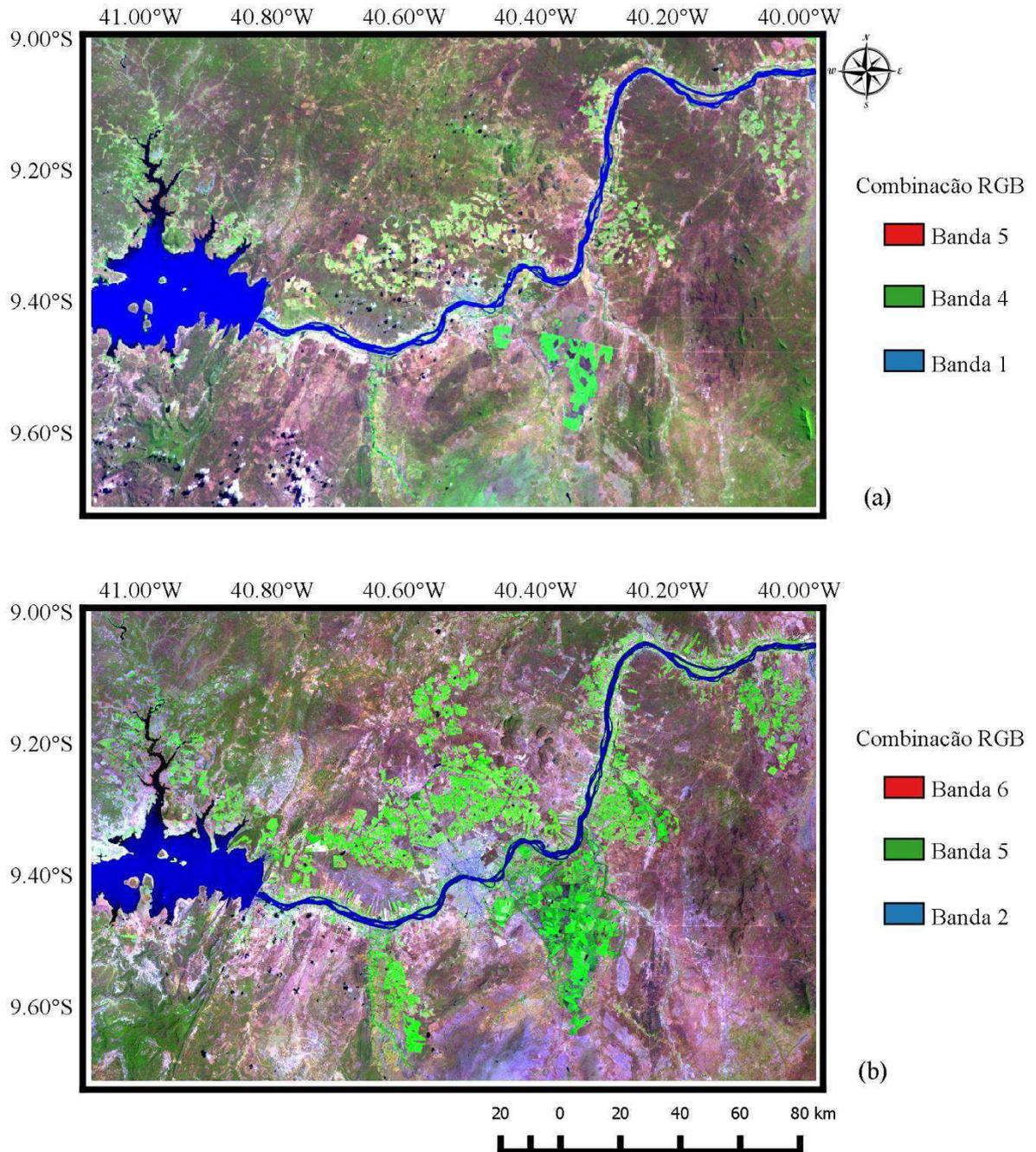


Figura 7: Reflectância nas faixas do IV-médio IV-próximo e azul em composição RGB nos dias 24/06/1987 (a) e 17/01/2017 (b) para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro

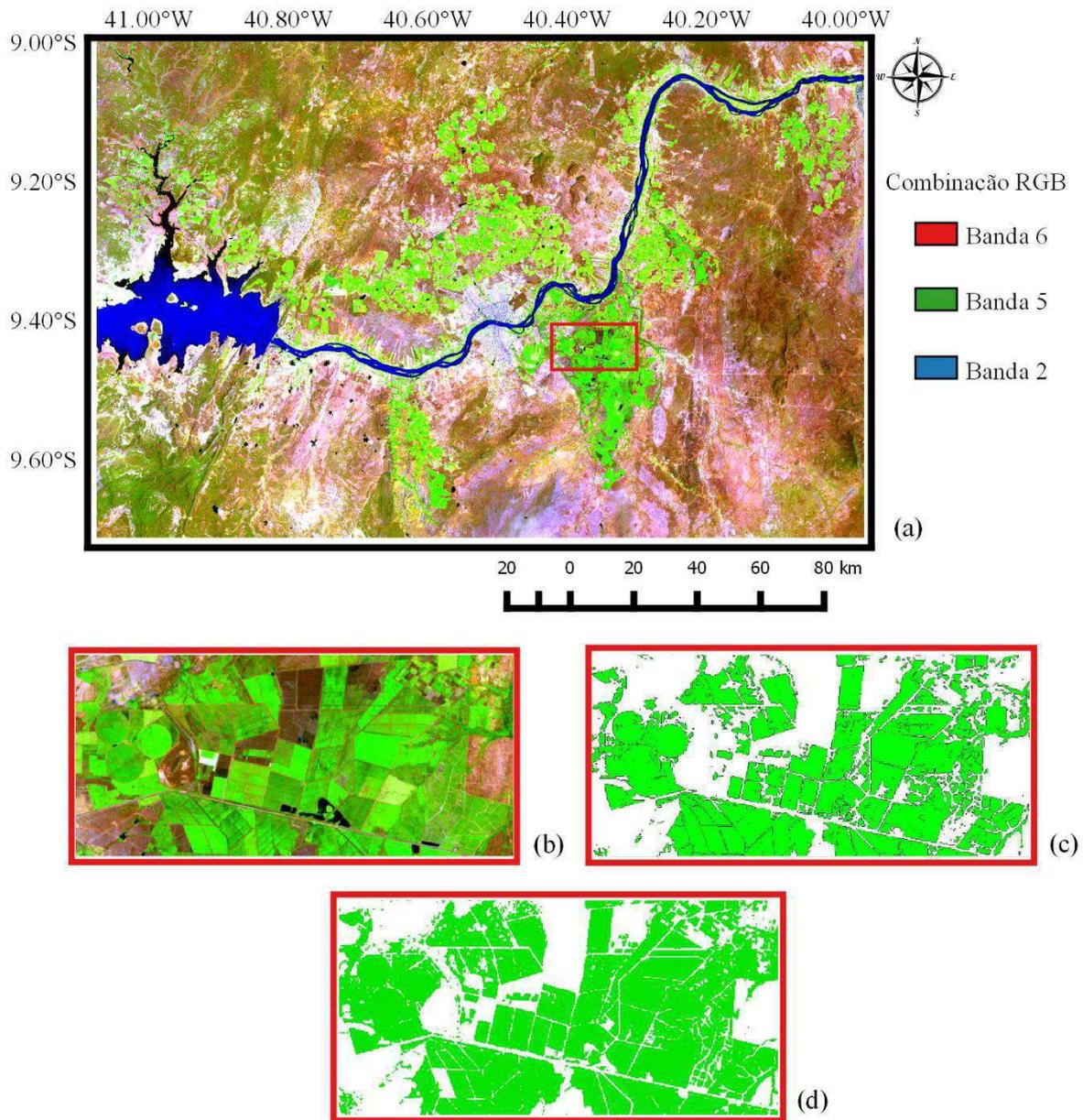


Figura 8: Exemplo 1 de distinção das parcelas irrigadas. Reflectância nas faixas do IV-médio IV-próximo e azul em composição RGB no dia 17/01/2017 (a) aproximação de uma área do recorte (b) reconhecimento das áreas irrigadas (c) e $NDVI > 0,4$ (d) para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro

No entanto, como é possível ver na Figura 9, a técnica que toma por base o $NDVI > 0,4$ é válida apenas para um recorte que compreenda um perímetro circunvizinho dos talhões e/ou pivôs agrícola, pois uma vegetação de qualquer natureza que se encontre no período de maturação e sadia, pode apresentar $NDVI > 0,4$, inviabilizando este meio de distinção.

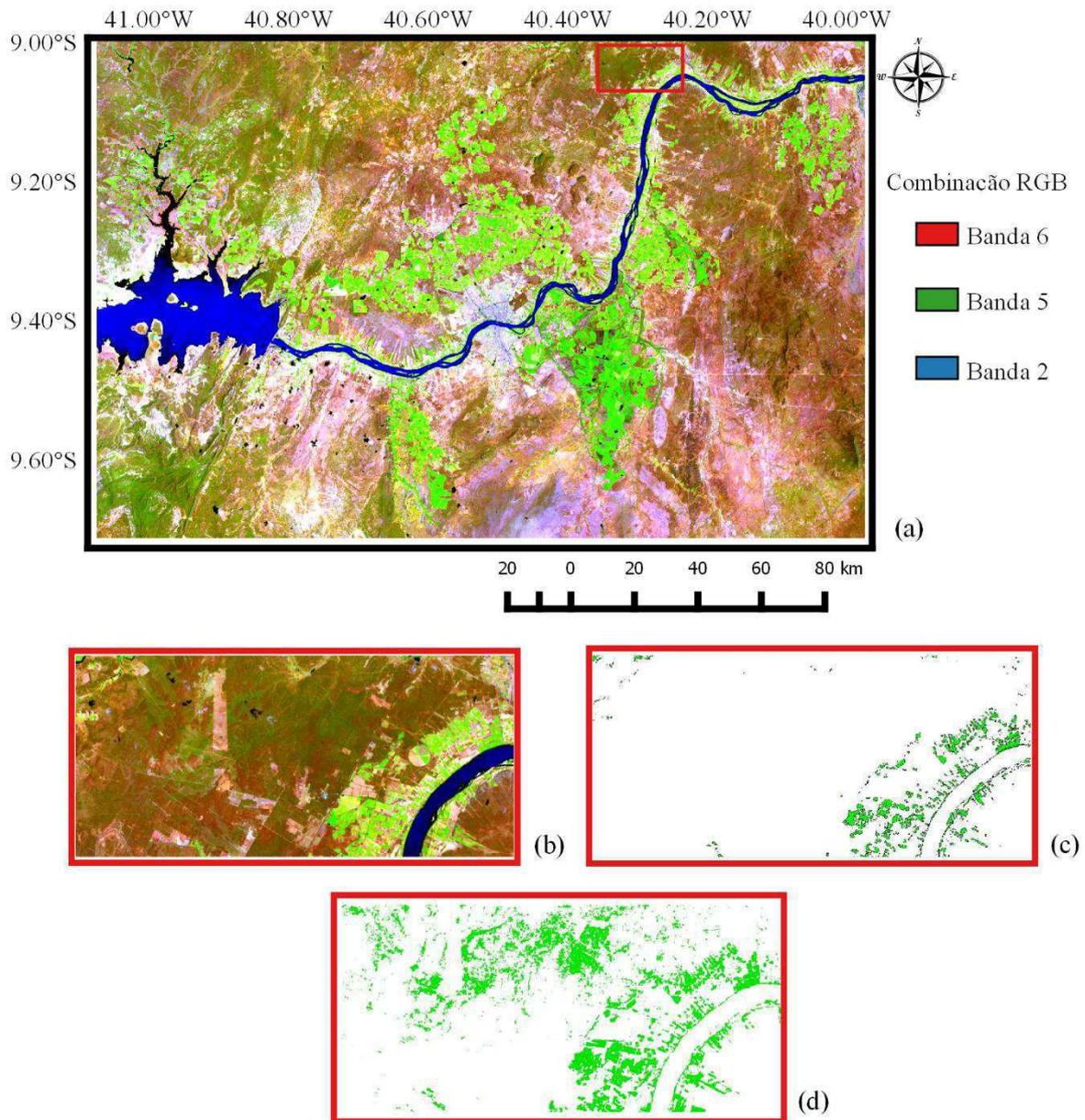


Figura 9: Exemplo 2 de distinção das parcelas irrigadas. Reflectância nas faixas do IV-médio IV-próximo e azul em composição RGB no dia 17/01/2017 (a) aproximação de uma área do recorte (b) reconhecimento das áreas irrigadas (c) e $NDVI > 0,4$ (d) para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro

Analisando o NDVI na Figura 10(a), em 1987 o índice indica um alto vigor da vegetação da caatinga, com valores superiores a 0,5, se mostrando comparáveis aos valores observados nas áreas irrigadas da época. Os trabalhos apresentados por Pace (2005) e Nicácio (2008) já haviam exibido valores superiores a 0,5 nas parcelas irrigadas da área de estudo.

Estando o NDVI intrinsecamente relacionado à presença de umidade na superfície, a cena ilustra bem a resposta da caatinga às chuvas que ocorreram no primeiro semestre do ano,

uma vez que é característico um elevado *green-up* dessa vegetação (resposta rápida à qualquer evento de chuva). Em contrapartida, na Figura 10(b) nota-se que espacialmente a cena apresenta um baixo NDVI, com exceção da área irrigada e de algumas regiões de vegetação nativa.

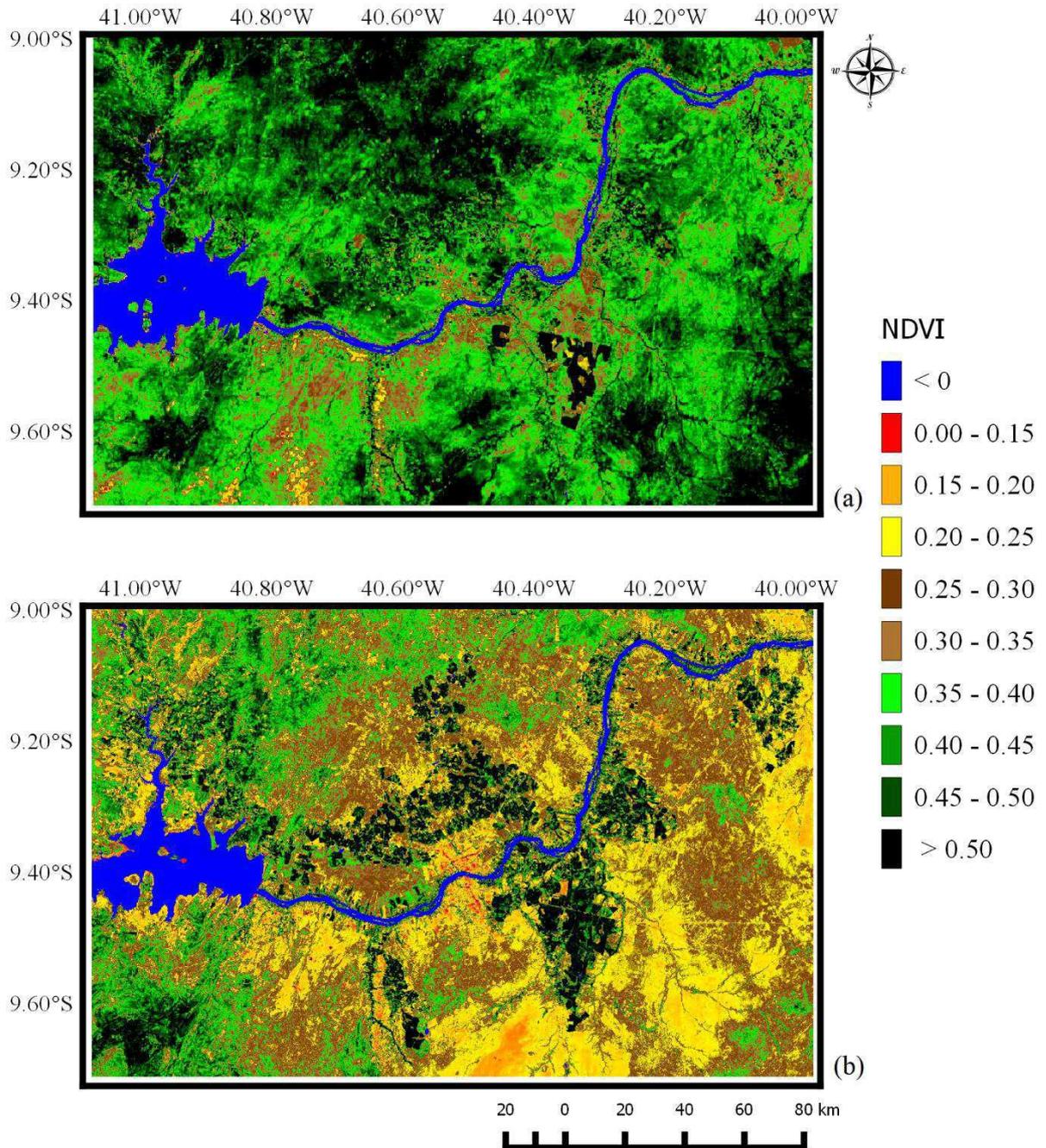


Figura 10: NDVI nos dias 24/06/1987 (a) e 17/01/2017 (b) para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro

Associado também às chuvas está o albedo (Figura 11(a) e 11(b)) o qual se apresenta menor em 1987, devido ao indicativo de maior presença de umidade no solo e nas áreas vegetadas em relação a 2017. Nos perímetros irrigados, o albedo em ambas as imagens ficou entre 16 e 18%. Nas áreas de solo exposto, o albedo variou de 12-21% em 1987 e de 19-32%

em 2017. Nas áreas de caatinga, ficou entre 10-12% em 1987 e entre 15-20% em 2017. Para Pace (2005) o albedo na superfície terrestre variou de 14 à 26%, com maiores valores ligados a áreas irrigadas, enquanto Nicácio (2008) apresentou albedo da caatinga entre 9-13%, das áreas irrigadas foi frequentemente entre 16-20% com pixels também entre 20 e 24% e para o solo exposto 27-32%.

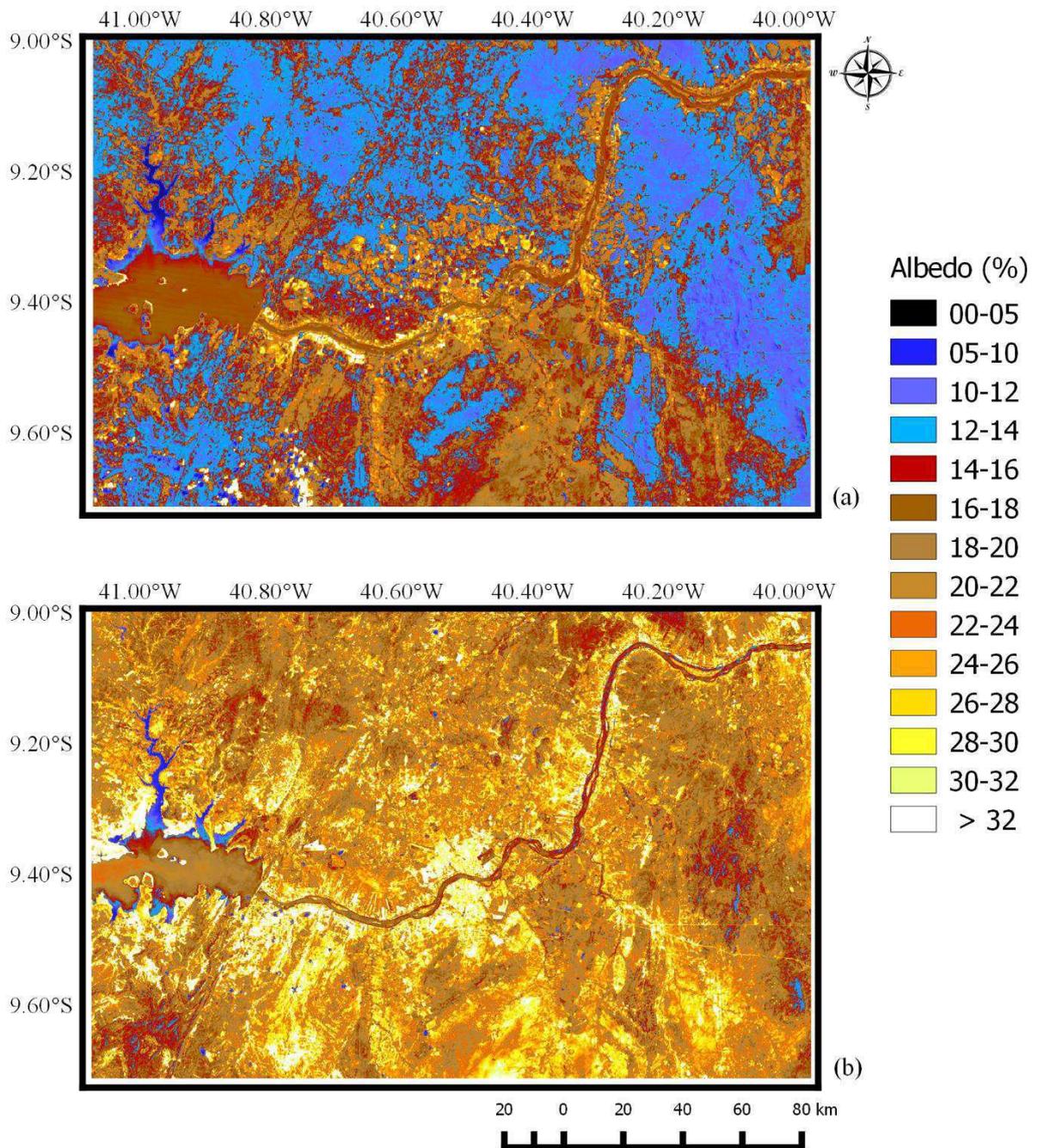


Figura 11: Albedo instantâneo da superfície nos dias 24/06/1987 (a) e 17/01/2017 (b) para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro

A clara expansão das áreas irrigadas tende a diminuir o albedo, no entanto, como pode ser visto na Figura 11(a) e 11(b), no período chuvoso, a umidade presente diminui o albedo em todos os tipos de cobertura de superfície.

Uma relação simples a ser apreciada, é entre o albedo da superfície e o saldo de radiação (Figura 12). As duas variáveis são inversamente proporcionais, pois, quanto maior o coeficiente de reflexão, mais energia é refletida em direção ao espaço, e assim, menor é o saldo, relação visível entre a Figura 11 e 12. Por natureza, a água apresenta um coeficiente de reflexão baixo, portanto, espera-se que em corpos d'água e em superfície humedecidas se observe um maior saldo de radiação.

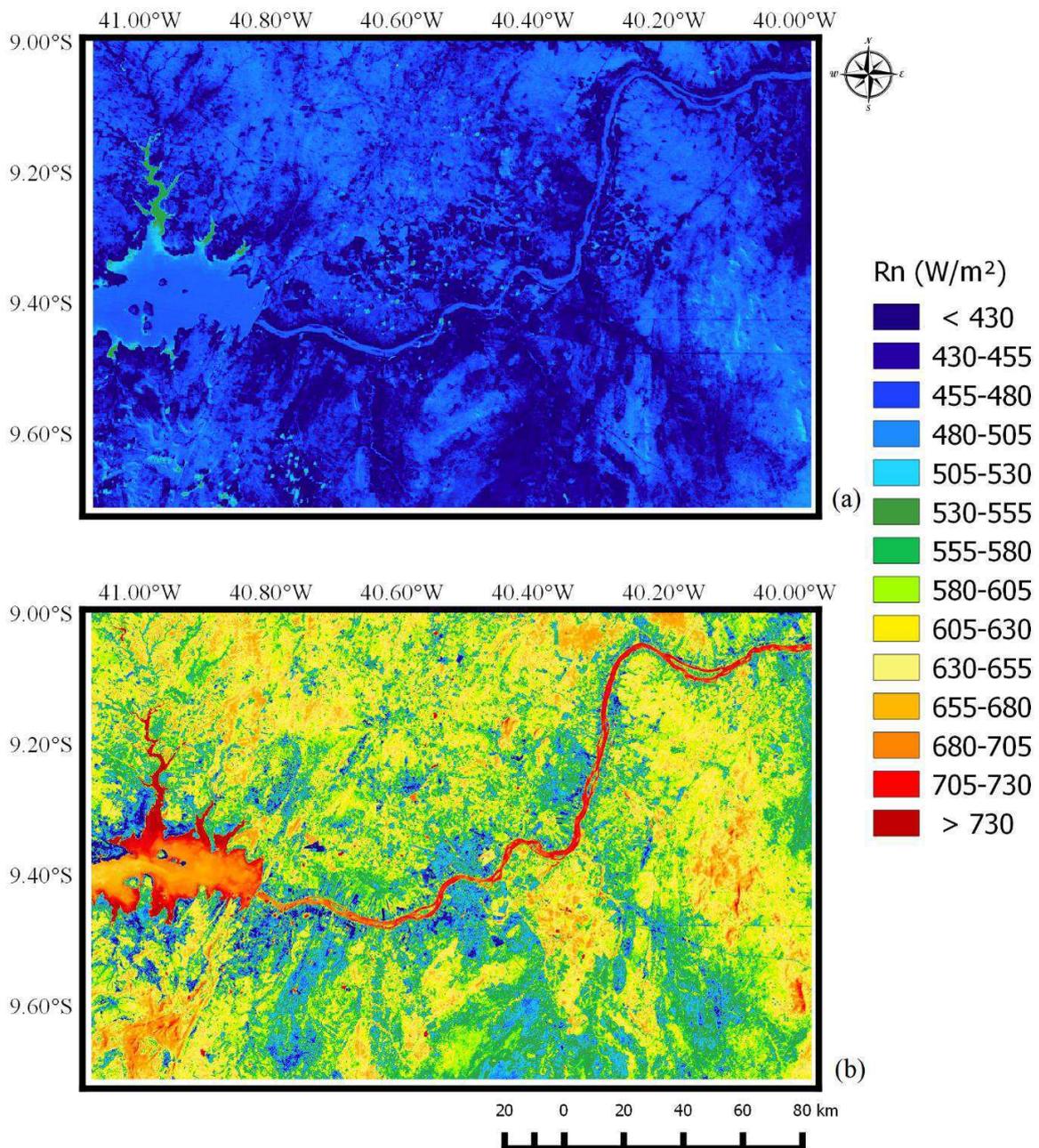


Figura 12: Saldo de radiação instantâneo, R_n ($W.m^{-2}$) nos dias 24/06/1987 (a) e 17/01/2017 (b) para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro

Essa linha de raciocínio poderia levar a crer que a cena de 1987 deveria apresentar um saldo superior ao de 2017 em qualquer ponto da imagem. No entanto uma outra variável interveniente que possui grande peso para o R_n é a radiação global (R_s), e conforme apresentado na Tabela 6, a radiação global instantânea em 17/01/2017 foi cerca de 50% superior a 24/06/1987, o que justifica a diferença apresentada entre a Figura 12(a) e 12(b).

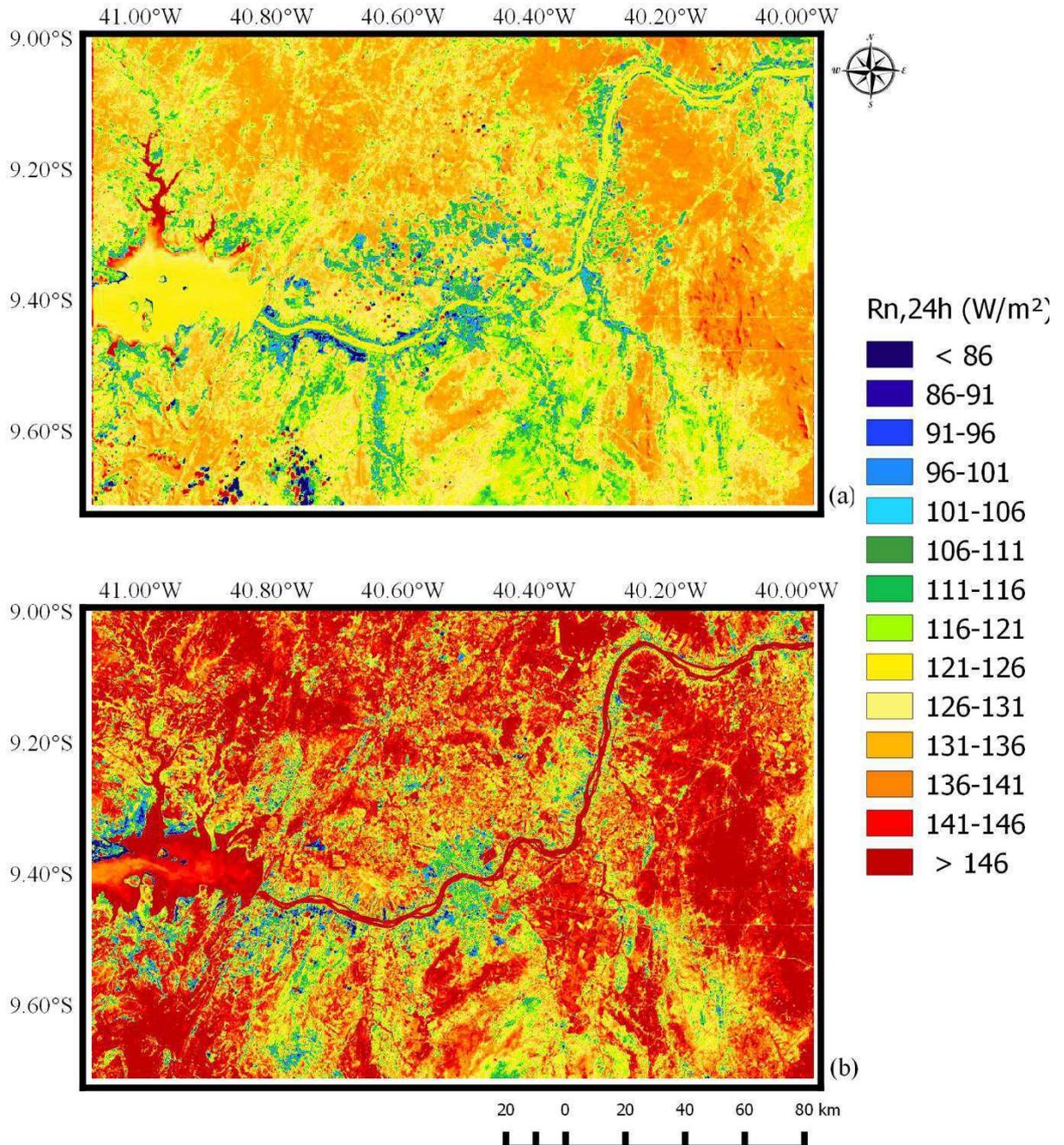


Figura 13: Saldo de radiação diário, $R_n,24h$ ($W.m^{-2}$) nos dias 24/06/1987 (a) e 17/01/2017 (b) para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro

Não obstante, em ambas as imagens, o saldo se apresenta mais elevado na superfície da água, nas áreas de vegetação nativa mais densa e áreas irrigadas, com variação entre 480-530 W.m^{-2} em 1987 e superiores a 630 W.m^{-2} em 2017. Pace (2005) encontrou saldo de radiação para o solo exposto inferior a 460 W.m^{-2} , entre 360,3 a 650,9 W.m^{-2} para cultivos agrícolas e superiores a 650 W.m^{-2} em corpos d'água. Nicácio (2008) obteve no solo exposto R_n de 542-580 W.m^{-2} , nas áreas de caatinga mais densa e cultivo agrícola 622-680 W.m^{-2} e superior a 730 W.m^{-2} na água.

No contexto diário, o saldo de radiação é imperioso para a determinação da ET_{24h} como pôde ser visto na Eq. 36 e comentado na Tabela 7. A radiação global diária superior no dia 17/01/2017, assegura um saldo de radiação diário também superior, mesmo estando a superfície no dia 24/06/1987 com um albedo inferior.

O mesmo discernimento entre as Figuras 12(a) e 12(b) se aplica para as Figura 13(a) e 13(b), onde em ambas as imagens, o saldo se apresenta mais elevado na superfície da água, nas áreas de vegetação nativa mais densa e áreas irrigadas, com variação entre 116-136 W.m^{-2} em 1987 e superiores a 131 W.m^{-2} em 2017.

A este ponto, uma observação deve ser feita acerca da amplitude observada no saldo de radiação instantâneo e no saldo de radiação diário. Apesar de ambas as Figuras 12 e 13 expressarem as unidades em W.m^{-2} , o equívoco de compará-las pode ser cometido. No entanto, como o R_{n24h} está expresso em termos médios para um dia (que representa 86400 s) confrontar ambas as imagens na unidade de W.m^{-2} não faz sentido.

As Figuras 14a e 14b denotam o fluxo de calor sensível instantâneo e as Figuras 16a e 16b o fluxo de calor latente também instantâneo. Como um reflexo da radiação global incidente, do saldo de radiação e da cobertura do solo, a imagem de 2017 demonstra fluxos mais intensos. Nas áreas irrigadas de ambas as imagens, H ficou entre 100 e 190 W.m^{-2} , nas demais áreas, quanto menor for a presença da vegetação, maior é o fluxo de calor sensível (com exceção do rio). Solo exposto teve H superior a 300 W.m^{-2} em 1987, como também em 2017. Demais áreas vegetadas, ficou entre 130 e 250 W.m^{-2} . Nicácio (2008) encontrou na área irrigada H inferior a 150 W.m^{-2} , na caatinga densa entre 150, e 250, W.m^{-2} e em outras áreas de caatinga entre 300,0 e 350,0 W.m^{-2} .

As imagens das Figuras 15(a) e 15(b), exibem a temperatura da superfície, obtidas a partir dos sensores termais à bordo dos satélites Landsat 5 e 8. A disposição do calor sensível na área em estudo, impacta nas cenas de T_s de forma clara. O cenário ilustra uma relação simples que se estabelece entre H e T_s , pois quanto maior for H (nas figuras 14a e 14b) maior será a T_s nas figuras 15c e 15d.

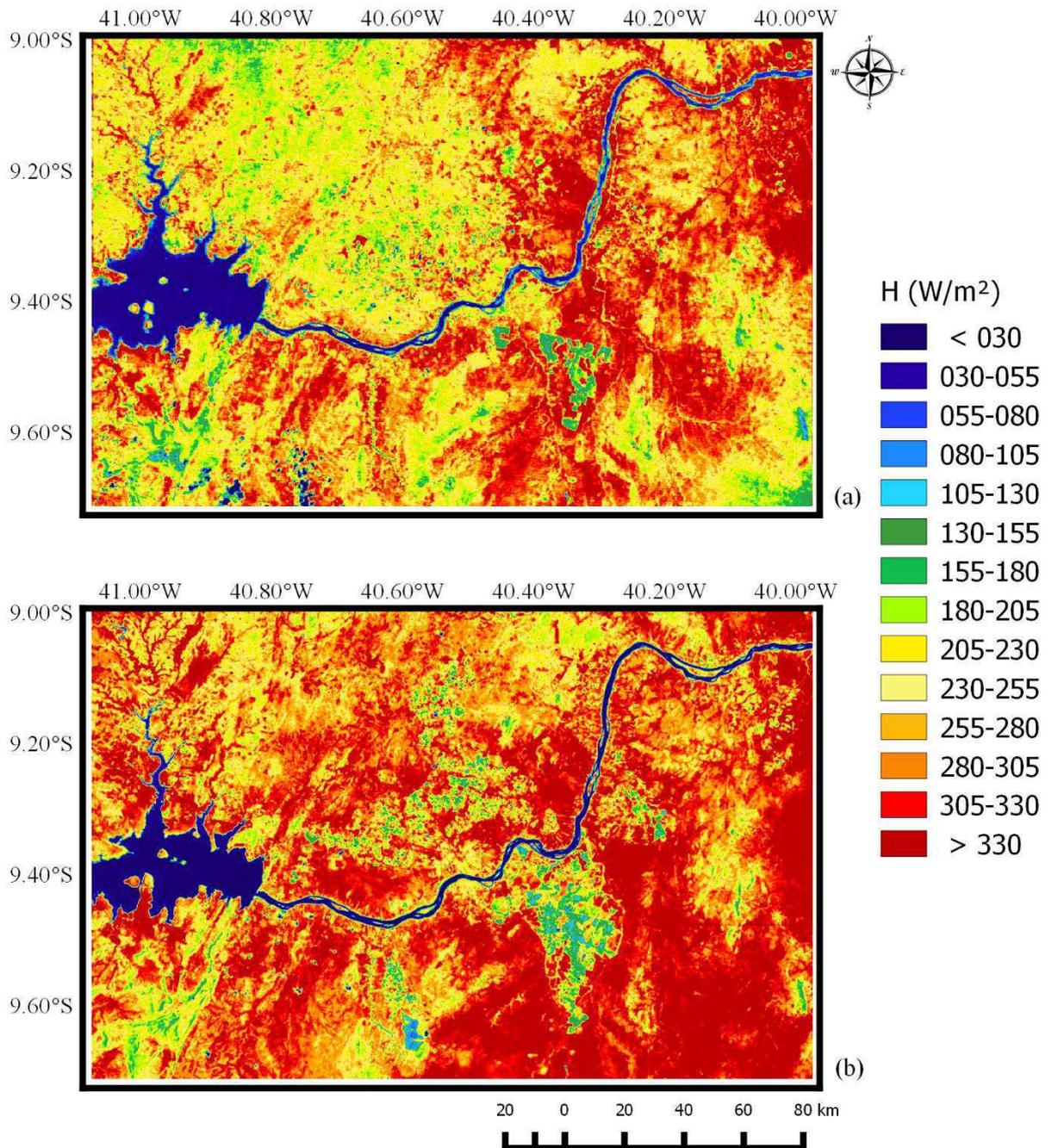


Figura 14: Fluxo de calor sensível instantâneo, H ($W.m^{-2}$) nos dias 24/06/1987 (a) e 17/01/2017 (b) para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro

As temperaturas nas áreas irrigadas de 1987 ficaram em torno de 22 e $24^{\circ}C$, ao passo que em 2017 elas ficaram entre 24 e $26^{\circ}C$. Demais superfícies ficaram entre 24 e $30^{\circ}C$ em 1987 e superiores a $30^{\circ}C$ em 2017. Pace (2005) obteve área irrigada T_s variando de $26,1^{\circ}C$ a $32,1^{\circ}C$ e superior a $33,5^{\circ}C$ nos solos desprovidos de vegetação.

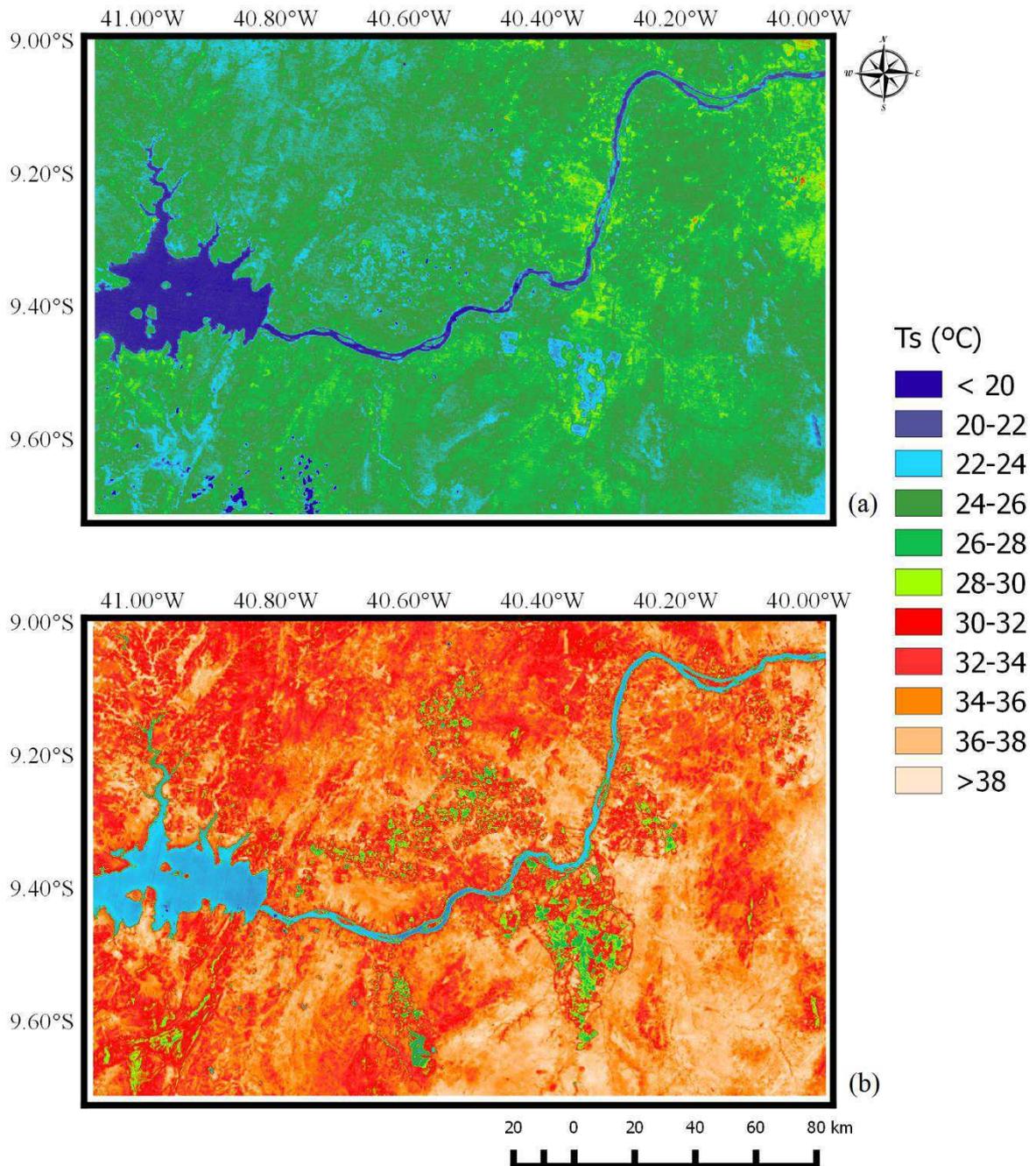


Figura 15: Temperatura da superfície instantânea, T_s (°C) nos dias 24/06/1987 (a) e 17/01/2017 (b) para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro

As Figuras 16(a) e 16(b) mostram o fluxo de calor latente, que basicamente expressou supremacia nas áreas irrigadas e de maior vigor vegetativo, devido a disponibilidade de umidade, o que representa o inverso do fluxo de calor sensível. LE ficou entre 200 e 300 $W.m^{-2}$ nas áreas irrigadas e de caatinga mais intensa em 1987 e entre 300 e 400 $W.m^{-2}$ em 2017. Nas demais superfícies terrestres, LE foi inferior a 200 $W.m^{-2}$ em 1987 e inferior a 300 $W.m^{-2}$ em 2017.

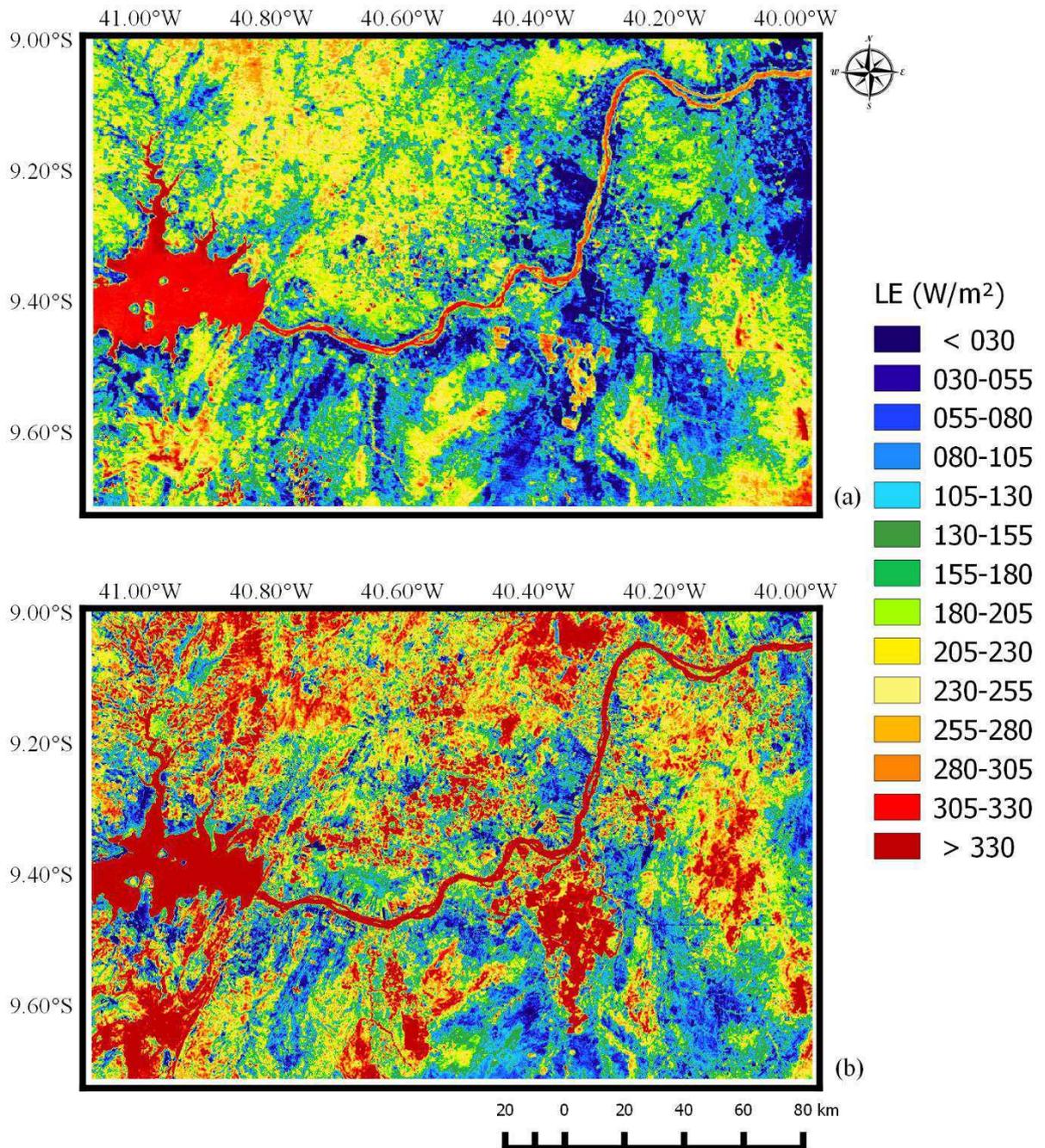


Figura 16: Fluxo de calor latente instantâneo, LE ($W.m^{-2}$) nos dias 24/06/1987 (a) e 17/01/2017 (b) para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro

Assim como em Silva et al., 2007; Borges et al., 2008 e Silva et al. 2012, a FEi (Figura 17) foi superior a 70% nas parcelas irrigadas, ilustrando a eficiência em utilizar a energia disponível para o processo evapotranspirativo.

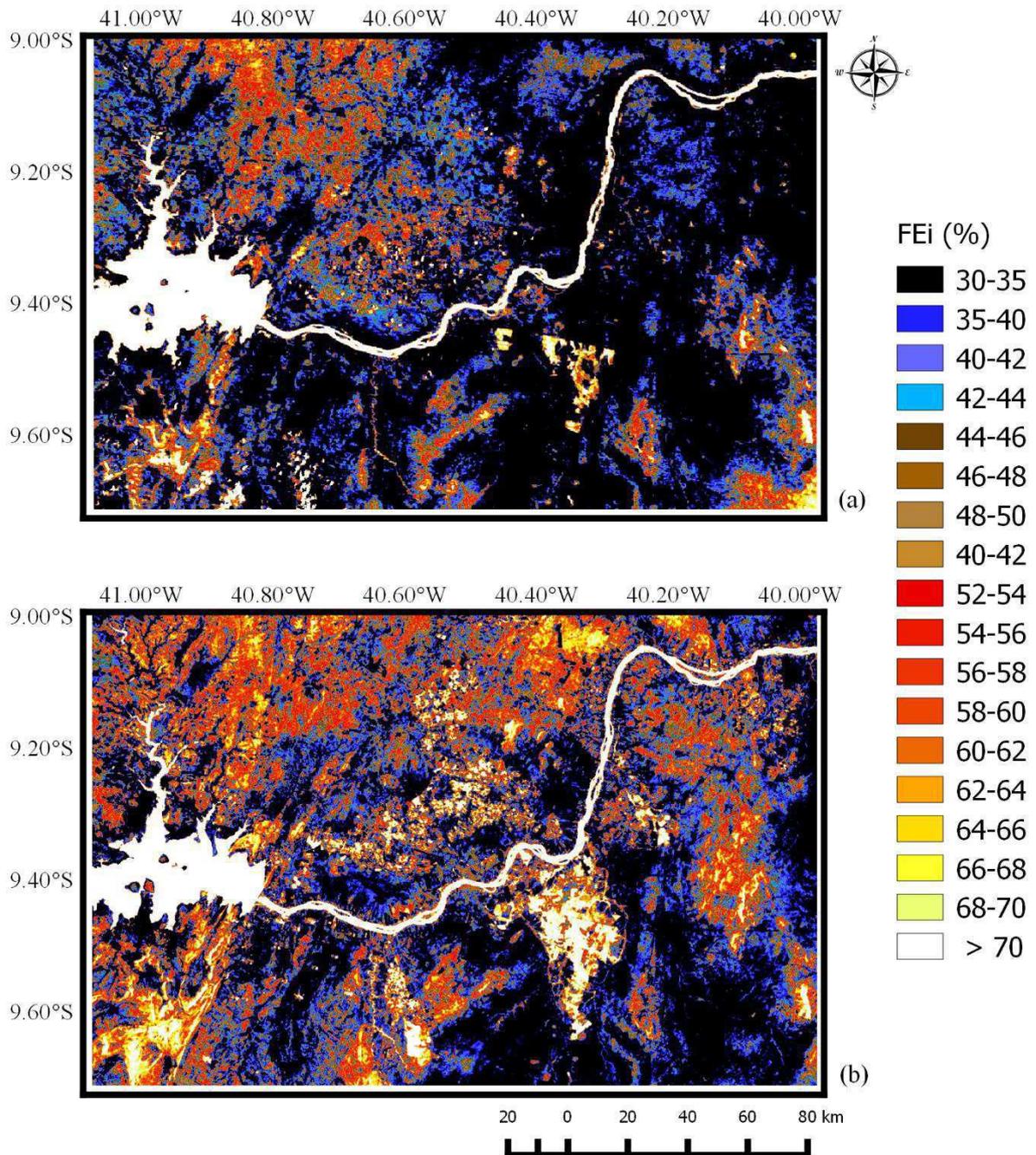


Figura 17: Fração evaporativa instantânea, FEi ($W.m^{-2}$) nos dias 24/06/1987 (a) e 17/01/2017 (b) para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro

A variação espacial da ET_{24h} para os dias 24/06/1987 e 17/01/2017 está apresentada na Figura 18(a) e 18(b), como consequência do fluxo de calor latente diário (produto das contribuições da FEi e do saldo de radiação diário). Naturalmente, quanto mais energia é aplicada ao processo evapotranspirativo, mais água transita da fonte (superfície) para um nível superior da atmosfera. Em decorrência da radiação global incidente diária no dia 17/01/2017 ter sido superior ao registrado em 24/06/1987, assim também o foi o Rn_{24h} , o que significa mais energia disponível para ET_{24h} .

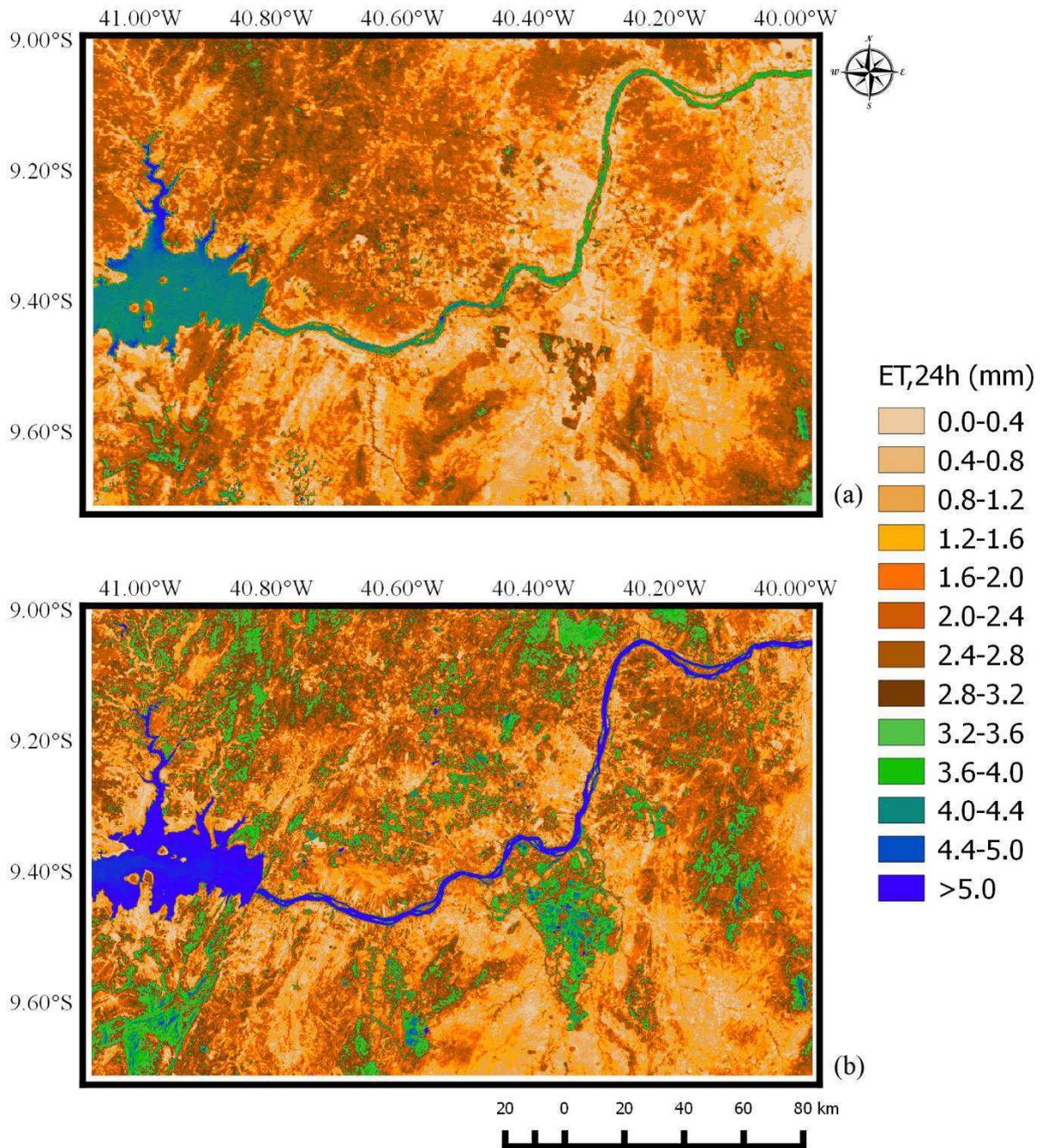


Figura 18: Evapotranspiração real diária, ET_{24h} (mm) nos dias 24/06/1987 e 17/01/2017 para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro

Observa-se que a ET_{24h} nas áreas em superfície terrestre ficou entre 0 e 4 mm em 1987 e entre de 0 a 5 mm em 2017, em corpos d'água ela foi superior a 4 mm em 1987 e superior a 5 mm em 2017. No cenário de 1987, as áreas irrigadas, a mata ciliar ao longo do rio São Francisco e a vegetação nativa mais densa ficaram com valores entre 2 e 3.6 mm, em 2017, essas superfícies foram expressas em tons de verde com ET_{24h} entre 3,2 e 5 mm. A caatinga de menor porte, a área urbana de Petrolina e Juazeiro e os bancos de areia ao longo do rio São

Francisco, delataram uma ET_{24h} inferior a 2 mm e em 2017, em tons de amarelo e marrom, encontram-se inferior a 3,2 mm.

Em resumo, a expansão das áreas irrigadas, tende a diminuir o albedo da superfície, aumentando assim o saldo de radiação, que por sua vez alimenta o fluxo de calor latente, combustível para o processo de transferência de água para a atmosfera. No entanto, a condição de umidade na superfície e a radiação solar incidente sobre esta, podem definir qual cenário encontra-se mais propício ao processo da evapotranspiração, pois como visto, a ET_{24h} foi menor em 1987 (condição mais úmida) do que em 2017 devido a relativa baixa radiação global observada no dia analisado.

Comumente em 1000 ha, num sistema de microirrigação, consome-se, entre a retirada de água da fonte e a ofertada aos cultivos, uma vazão equivalente a 1 m³/s, o que significa 86.400 m³ por dia. Portanto, para uma área irrigada que abrange 20.375ha em 1987, pode-se estimar que eram extraídos das fontes uma vazão de 20,4m³/s ou um volume d'água com cerca de 1,8 milhão de m³ em apenas um dia. Em 2017, com o crescimento de aproximadamente 300% da área irrigada (que se encontra em torno de 73.088 ha) poderia ser estimado um volume de 73,1 m³/s ou ainda 6,3 milhões de m³ em apenas um dia.

Entretanto, a ANA e o Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH) (ANA, 2018) dispõem de metadados da demanda de água média, que corresponde à estimativa da vazão média de retirada, ou seja, a água captada destinada a atender os diversos usos consuntivos. A demanda média para irrigação foi calculada para o ano-base 2014 (e atualizada em março de 2016) utilizando dados dos planos de recursos hídricos (Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos e ANA) e levantamento de pivôs por imagem de satélite (EMBRAPA/ANA), além de taxas anuais de crescimento da área irrigada, calculadas pela Câmara Setorial de Equipamentos de Irrigação da Abimaq (Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos).

Esses dados advindos dos metadados da ANA e do SNIRH expressaram para a área de estudo, uma irrigação estimada (IE_{ANA}) da ordem de 38,9 m³/s, o que representa 3,4 milhões de m³/dia em média que é retirado do rio e que se destina à irrigação.

A ET_{24h} total das áreas irrigadas no dia 17/01/2017 foi de 42,3 m³/s, ou seja, 3,7 milhões de m³ por dia, na qual considerando uma eficiência no uso da água de 80%, se fazem necessários uma vazão equivalente a 53 m³/s ou 4,6 milhões de m³ por dia para suprir as necessidades dos cultivos. Essa diferença entre o que foi divulgado pela ANA/SNIRH, soma um total de 1,2 milhão de m³ de água que é retirada do rio São Francisco, em apenas um dia.

Os dados sobre água aplicada a irrigação divulgados pela ANA podem ser questionados, tanto com base no cálculo do que é comumente aplicado em 1000 ha (1 m³/s) quanto devido a

conjuntura dos recursos hídricos do Brasil (ANA, 2017b), relatório que informa que a demanda total para irrigação dos 6,95 milhões de ha no Brasil é de apenas 969 m³/s, ou seja, para cada 1000 ha uma quantia de 0,139 m³/s, entrando em contradição até mesmo com os próprios dados vetoriais em ANA,2018.

As imagens disponíveis do MODIS no ano de 2015, considerando a revisita da área de estudo pelo sensor, erros durante o imageamento ou criação da imagem e a condição de nebulosidade, foram para os DOA 10, 18, 41, 63, 73, 93, 107, 167, 200, 210, 217, 233, 251, 267, 278, 295, 318, 334, 345 e 350. A Tabela 8 ilustra os dados geométricos e meteorológicos que possibilitaram a execução do SEBAL. Os dados meteorológicos foram coletados da plataforma do projeto SONDA, situada em Petrolina-PE (9° 4' 8" S e 40° 19' 11" W) nos horários pertinentes à geração de cada imagem.

Tabela 8: Hora (UTC); quadrado do inverso da distância relativa Terra-Sol, dr (adimensional); cosseno do ângulo zenital solar, $\cos Z$ (adimensional); temperatura do ar, T_a (°C); pressão atmosférica, P_a (kPa); umidade relativa, UR (%); velocidade do vento, v (m/s²); transmissividade atmosférica, τ_{sw} (adimensional) e radiação solar global instantânea, R_s (W.m⁻²) na passagem dos satélites TERRA e AQUA no meridiano local para os dias selecionados

Data	DOA	Satélite	Hora	dr	$\cos Z$	T_a	P_a	UR	v	τ_{sw}	R_s
10/01	10	AQUA	17:03	0,934	0,836	30,48	97,19	42,69	4,65	0,741	791,49
18/01	18	TERRA	13:06	1,031	0,905	26,03	97,19	61,05	3,59	0,746	951,46
10/02	41	TERRA	13:07	1,025	0,921	24,47	97,06	67,95	1,82	0,747	964,28
04/03	63	TERRA	13:01	1,015	0,854	23,99	97,06	69,26	3,55	0,739	875,22
14/03	73	TERRA	13:07	1,010	0,923	25,45	96,88	65,81	3,75	0,746	951,38
03/04	93	AQUA	16:02	0,999	0,926	31,05	97,01	34,81	2,98	0,760	960,47
17/04	107	TERRA	13:05	0,991	0,868	25,52	97,08	70,30	1,88	0,736	865,40
16/06	167	TERRA	13:09	0,968	0,805	24,98	97,31	72,70	2,68	0,727	774,39
19/07	200	TERRA	13:00	0,968	0,729	18,56	97,51	76,80	1,24	0,730	704,60
29/07	210	AQUA	16:05	0,971	0,824	26,30	97,55	46,70	5,06	0,746	815,08
05/08	217	TERRA	13:07	0,973	0,836	20,18	97,56	76,40	3,88	0,742	824,37
21/08	233	TERRA	13:07	0,979	0,872	23,51	97,34	74,30	2,75	0,739	863,03
08/09	251	TERRA	13:05	0,987	0,896	23,34	97,29	62,57	4,30	0,750	907,28
24/09	267	TERRA	13:05	0,996	0,926	24,31	97,37	62,83	5,36	0,751	947,22
05/10	278	TERRA	13:02	1,002	0,911	25,28	97,06	67,76	3,46	0,744	928,28
22/10	295	TERRA	13:09	1,012	0,977	27,00	97,06	59,81	5,22	0,753	1017,04
14/11	318	TERRA	14:00	1,023	0,972	30,11	97,11	48,94	2,34	0,753	1022,60
30/11	334	TERRA	14:00	1,028	0,958	27,85	97,23	53,90	4,34	0,753	1013,28
11/12	345	TERRA	13:07	1,031	0,929	27,08	97,26	58,36	2,97	0,742	919,60
16/12	350	TERRA	14:00	1,032	0,945	26,59	97,14	52,42	6,01	0,756	1007,37

A Tabela 9 exibe a configuração diária para a radiação solar no topo da atmosfera, em superfície e a transmissividade a partir destas.

Tabela 9: Radiação solar diária no topo da atmosfera, R_{Stoa} (MJ.m⁻²); radiação solar global diária, R_{S24h} (MJ.m⁻²); transmissividade atmosférica diária, τ_{sw24h} (adimensional) na passagem dos satélites TERRA e AQUA no meridiano local para os dias selecionados

Data	DOA	Satélite	R_{Stoa}	R_{S24h}	τ_{sw24h}
10/01	10	AQUA	39,32	25,51	0,649
18/01	18	TERRA	39,38	26,66	0,677
10/02	41	TERRA	39,32	25,54	0,649
04/03	63	TERRA	38,59	24,72	0,641
14/03	73	TERRA	37,95	26,47	0,697
03/04	93	AQUA	36,10	25,34	0,702
17/04	107	TERRA	34,50	22,84	0,662
16/06	167	TERRA	29,36	19,82	0,675
19/07	200	TERRA	30,35	19,31	0,636
29/07	210	AQUA	31,20	20,15	0,646
05/08	217	TERRA	31,89	20,77	0,651
21/08	233	TERRA	33,67	23,83	0,708
08/09	251	TERRA	35,69	25,85	0,724
24/09	267	TERRA	37,20	26,87	0,722
05/10	278	TERRA	37,99	26,41	0,695
22/10	295	TERRA	38,77	27,47	0,709
14/11	318	TERRA	39,14	25,04	0,640
30/11	334	TERRA	39,16	28,41	0,725
11/12	345	TERRA	39,17	27,65	0,706
16/12	350	TERRA	39,17	27,98	0,714

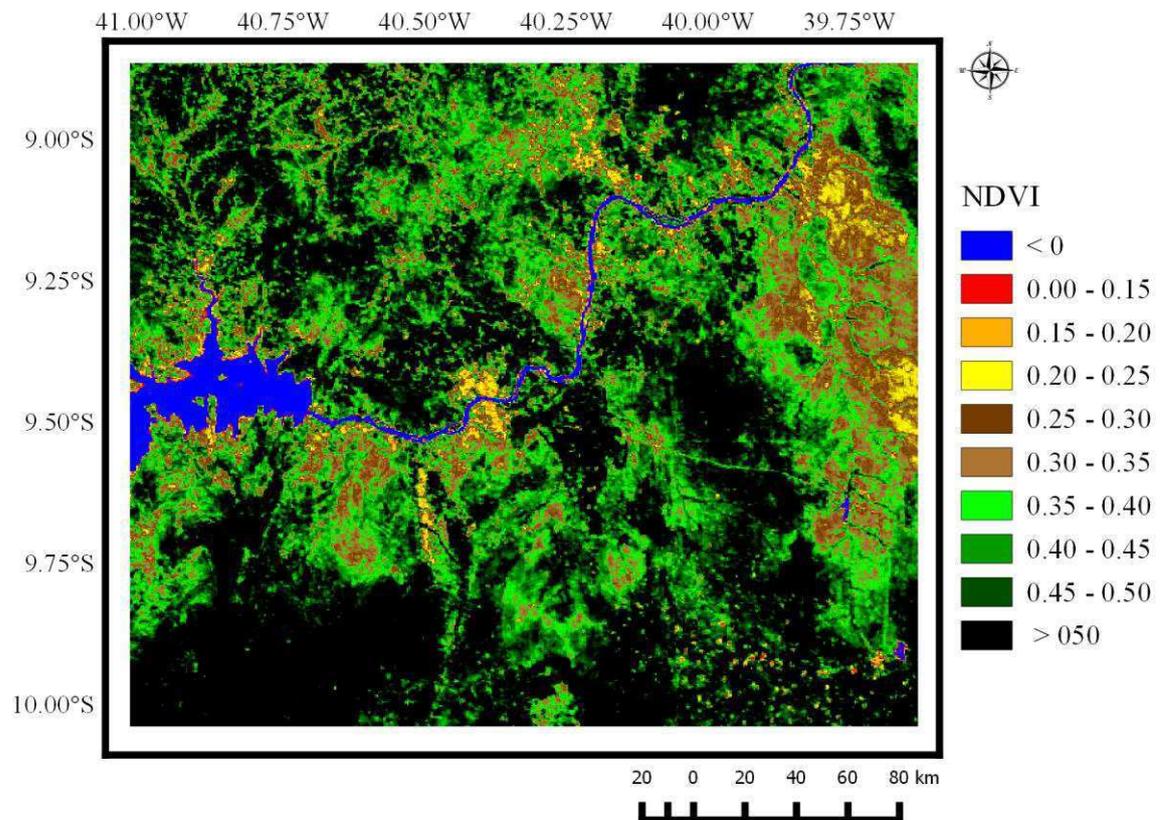


Figura 19: NDVI no dia 18/01/2015 para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro

A Figura 19 exibe um mapa temático de NDVI para o dia 18/01/2015 gerado a partir do produto MOD09GQ do MODIS. Apesar de se tratar da mesma época do ano, essa cena se mostra diferente da de 17/01/2017 do Landsat 8, devido às diferentes condições de tempo. A precipitação, segundo a estação do INMET em Petrolina, soma um volume de 151,3 mm entre novembro de 2014 e janeiro de 2015. Este total se mostra significativo para a composição do verdor ao qual a caatinga apresentou.

Na Figura 20, encontra-se o mapa temático da Ts para o dia 18/01/2015, gerado segundo o produto MOD11A1, com valores para a área irrigada entre 32 e 38°C. Os perímetros com vegetação nativa densa, demonstraram uma variabilidade de mesma intensidade, o lado sobradinho apresentou valores inferiores a 28°C e demais corpos d'água oscilaram entre 28 e 34°C. Alguns pixels abaixo de 26°C representam nuvens presentes na passagem do sensor pelo meridiano local. Demais áreas presentes no recorte ilustraram valores superiores a 38°C.

Visando melhorar a resolução espacial da imagem, que é de aproximadamente 1 km, foi realizado o procedimento de desagregação dos pixels, conhecido como “*downscaling*” para obter uma Ts com uma resolução igual à do produto MOD09GQ, ou seja, aproximadamente 250 m (procedimento descrito no subitem 3.4.2.1). O resultado do *downscaling* encontra-se exposto na Figura 21.

Para cada pixel de 1km, após a desagregação, foram gerados quatro pixels de 250m. A técnica teve como finalidade estabelecer que a média de cada conjunto de quatro pixels, seja igual ao valor do pixel original da imagem do MOD11A1. Como resultado, a Figura 21 expõe basicamente a mesma configuração observada na Figura 20, no entanto, com uma resolução melhorada que propicia um grau de detalhamento superior. Em virtude desta melhoria, os mapas subsequentes dispuseram de uma maior grau de detalhamento, o que proporcionou um recorte mais fidedigno das parcelas irrigadas e uma estimativa da exigência hídrica dos cultivos mais detalhada.

O albedo da superfície para o dia 18/01/2015 está representado na Figura 22. Nas áreas irrigadas, o albedo ficou entre 14 e 18%, em áreas de caatinga densa, a variabilidade foi maior, com valores entre 12 e 18%, com regiões que apresentaram refletividade inferior aos perímetros irrigados. Demais superfícies terrestre apresentaram albedo entre 16 e 24%

Em decorrência das chuvas que ocorreram nos meses que antecederam a passagem do satélite, e conseqüentemente causaram o transporte de sedimentos para a calha do rio. Como consequência, as águas do rio São Francisco tendem a adquirir uma coloração mais amarronzada, e aumentar a sua capacidade em refletir a radiação solar, o que culmina em um albedo, por vezes, cerca de duas vezes maior se comparado com períodos sem precipitação.

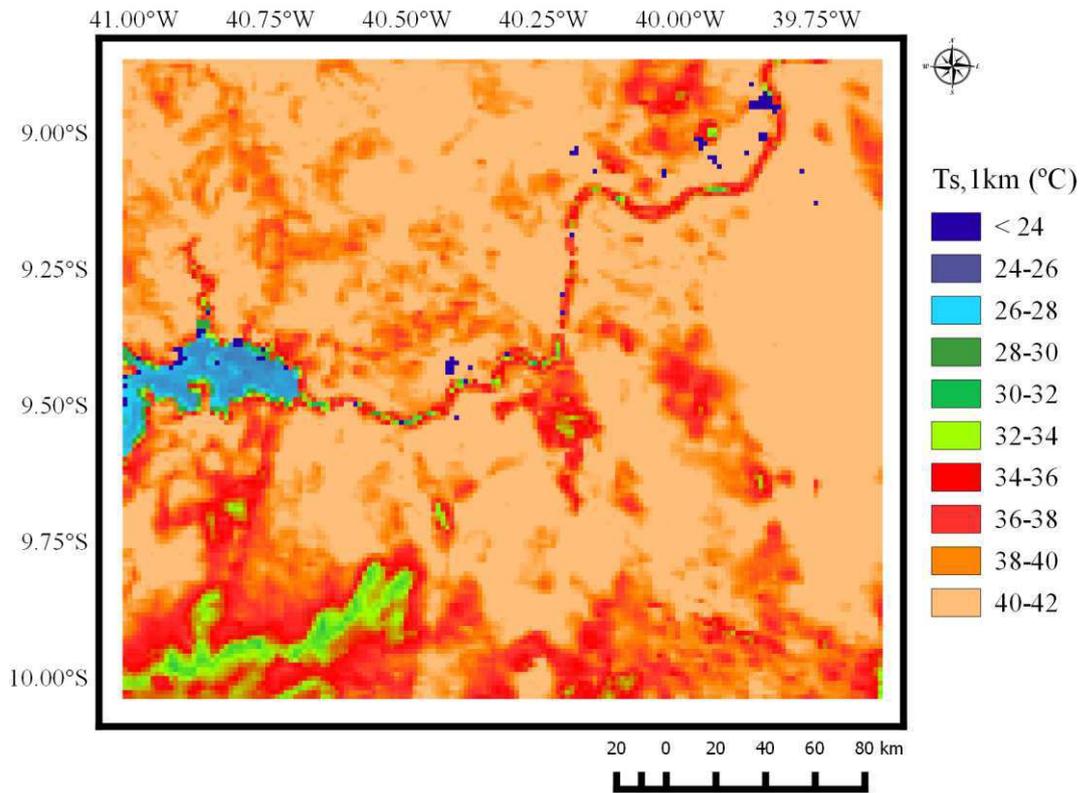


Figura 20: Ts (°C) a partir do produto MOD11A1 no dia 18/01/2015 para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro

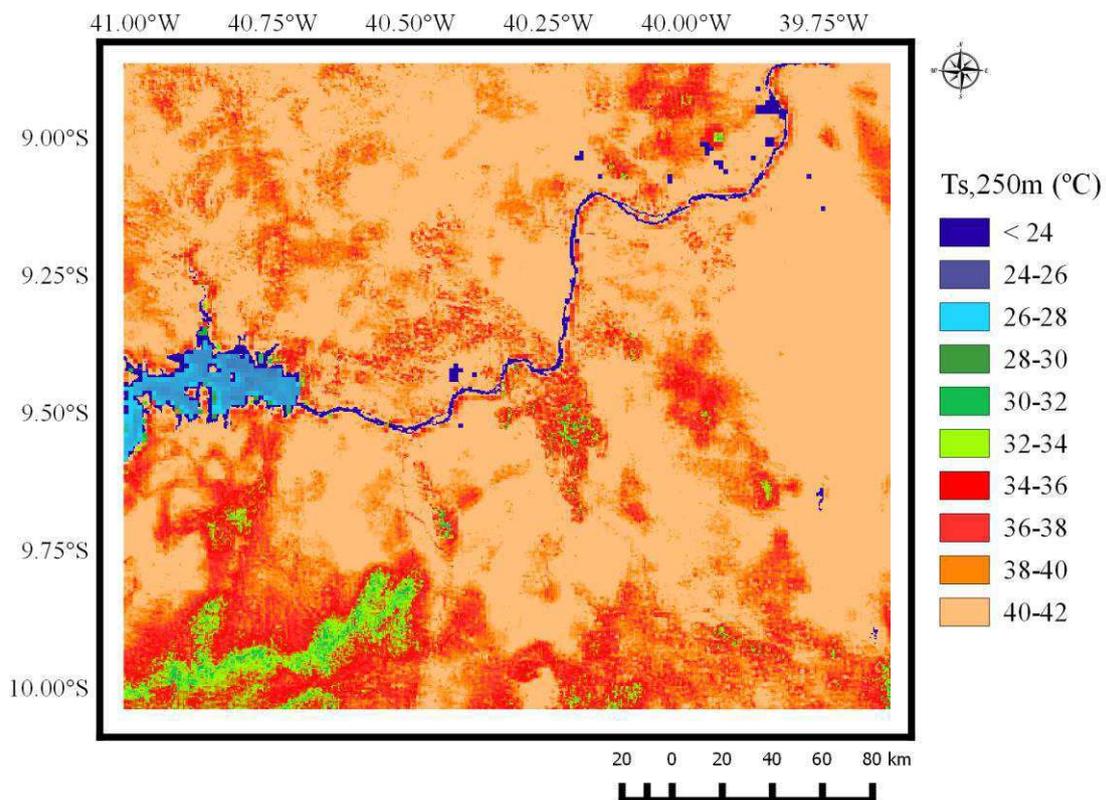


Figura 21: Ts (°C) a partir do downscaling no dia 18/01/2015 para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro

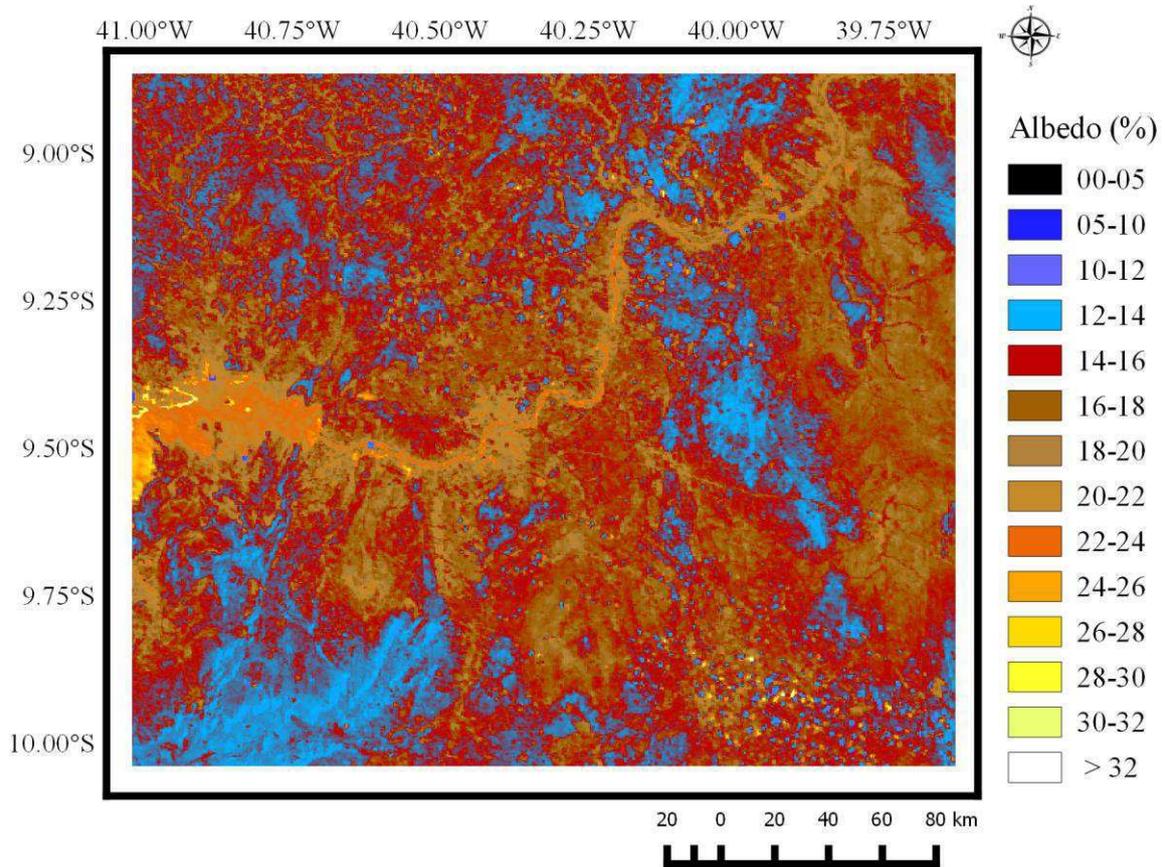


Figura 22: Albedo da superfície (%) no dia 18/01/2015 para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro

Os fluxos de calor sensível e latente, apresentaram, como esperado, dualidade entre os mapas expostos nas figuras 23 e 24. Os fluxos de calor sensível foram intensos para superfícies que apresentaram NDVI mais baixo, como solo exposto e caatinga aberta (vegetação nativa mais esparsa) com valores superiores a 330 W.m^{-2} , ao passo que as áreas irrigadas e de caatinga densa os valores foram entre 155 e 250 W.m^{-2} .

Por outro lado, os fluxos de calor latente foram intensos para superfícies com NDVI alto, como as áreas irrigadas e caatinga densa, que expressaram valores superiores a 330 W.m^{-2} , enquanto que áreas com solo exposto e caatinga aberta apresentaram valores inferiores a 200 W.m^{-2} , demonstrando grande variabilidade.

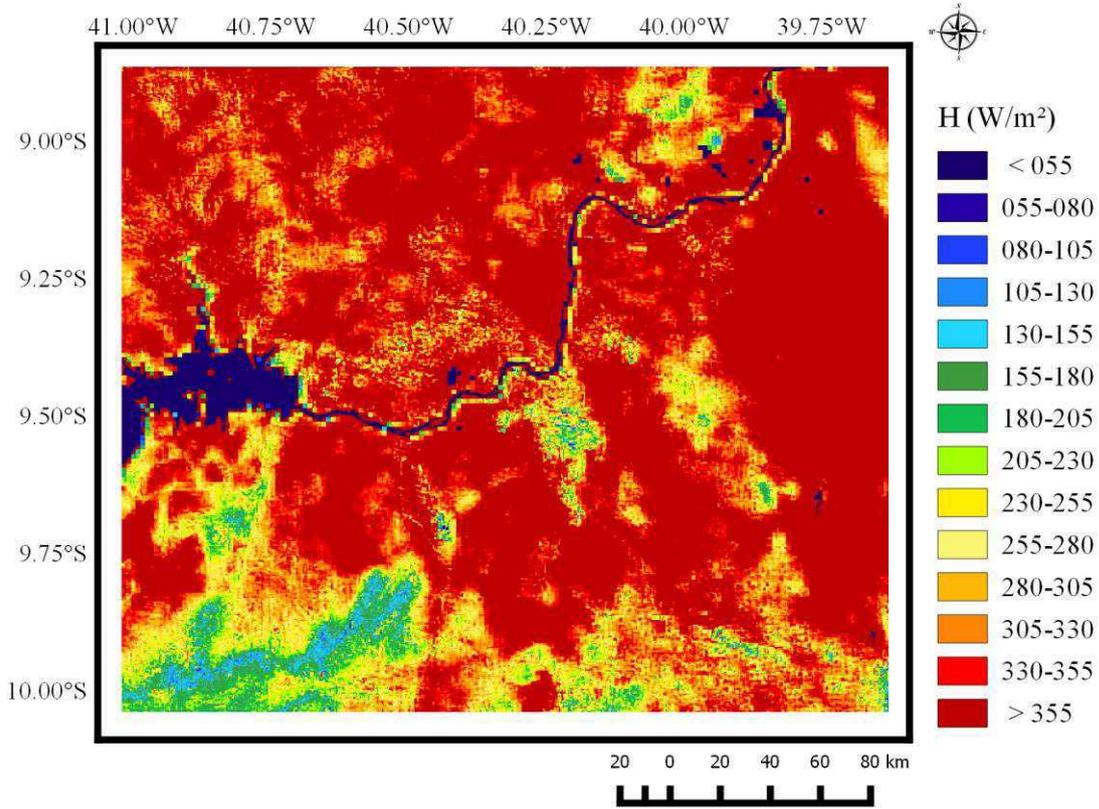


Figura 23: Fluxo de calor sensível instantâneo (W.m-2) no dia 18/01/2015 para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro

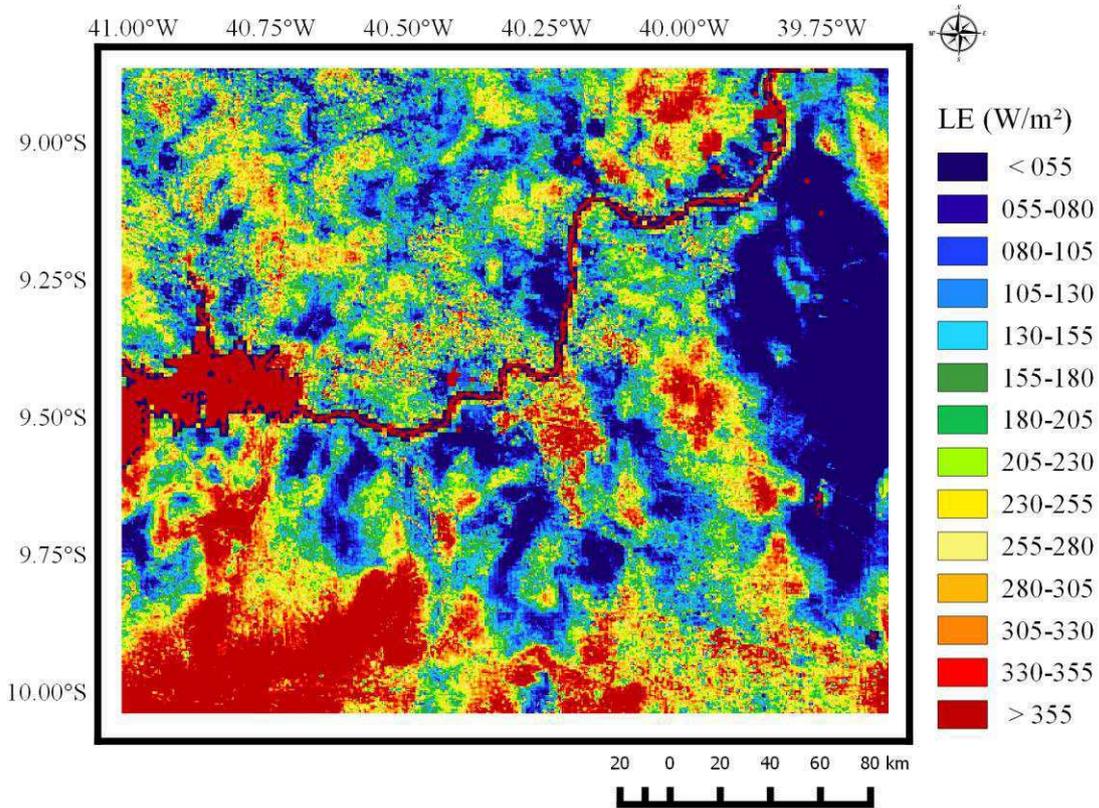


Figura 24: Fluxo de calor latente instantâneo (W.m-2) no dia 18/01/2015 para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro

O mapeamento da fração evaporativa instantânea (FEi) foi apresentado na Figura 25. Basicamente, os perímetros irrigados apresentaram valores superiores a 60%, o que garante que boa parte da energia disponível nesses perímetros seja utilizada para o fluxo de calor latente e evapotranspiração.

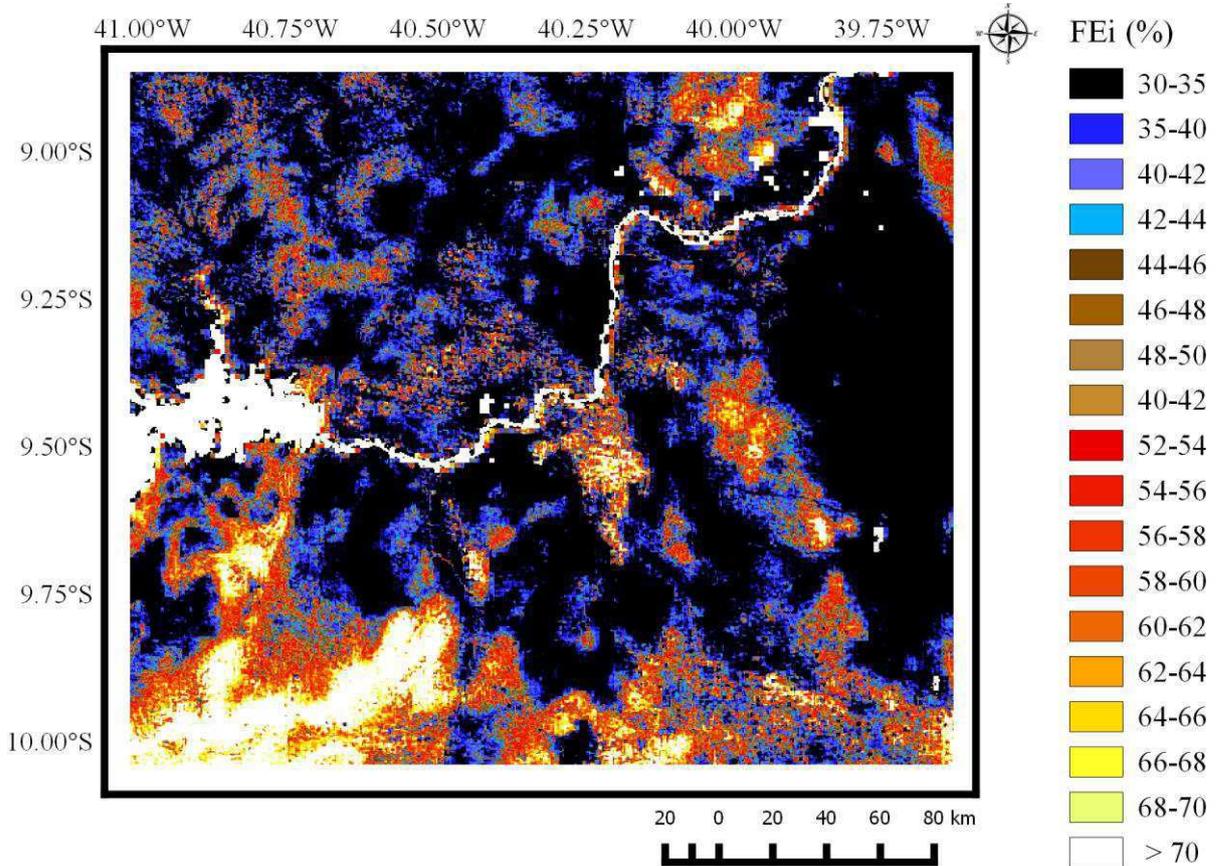


Figura 25: Fração evaporativa instantânea (%) no dia 18/01/2015 para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro

Mais intrinsecamente atrelado a evapotranspiração real diária, está o mapa do saldo de radiação médio diário apresentado na Figura 26. Como resposta a alta radiação global incidente para este dia de $26,66 \text{ MJ.m}^{-2}$, o saldo se mostra elevado em toda a cena. Os maiores valores estão relacionadas às áreas irrigadas e de caatinga densa, tendo esta última superado o saldo das áreas de cultivo irrigado em algumas áreas da imagem, devido ao albedo relativamente menor apresentado na Figura 22. Para os dois tipos de superfície supracitados, o saldo de radiação diário foi superior a 180 Wm^{-2} . Em decorrência do albedo substancialmente maior nos pixels que contém o rio São Francisco, o $R_{n,24h}$ nestes foi inferior ao do restante da imagem, configuração atípica para os tipos de superfície em questão. O $R_{n,24h}$ para o rio São Francisco teve valores entre 156 e 176 Wm^{-2} .

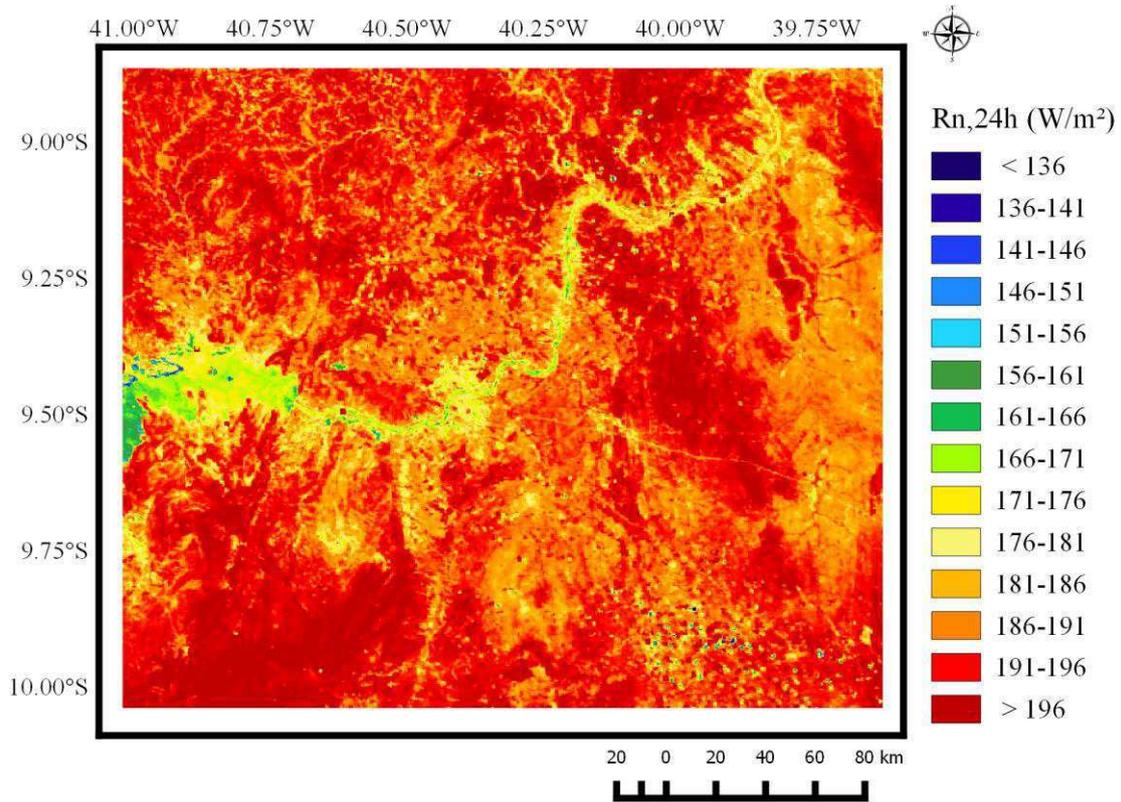


Figura 26: Saldo de radiação médio diário (W.m-2) no dia 18/01/2015 para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro

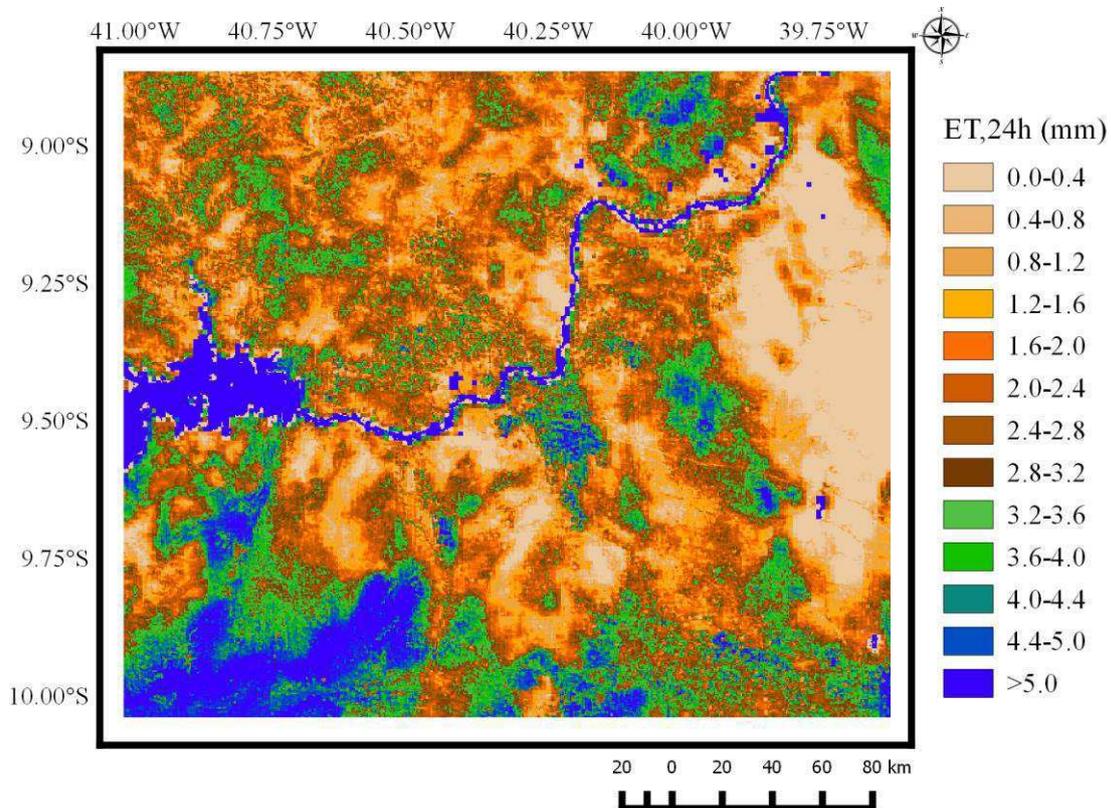


Figura 27: Evapotranspiração real diária, ET,24h (mm) no dia 18/01/2015 para o Submédio do rio São Francisco, polo de irrigação Petrolina/Juazeiro

A evapotranspiração real diária a ET_{24h} se mostrou superior ao caso apresentado na Figura 18, uma vez que havia em 18/01/2015 uma maior disponibilidade de umidade em superfície, um R_{s24h} maior e por consequência, um R_{n24h} também mais elevado. A heterogeneidade da ET_{24h} em ambas as cenas foi similar, devido a descontinuidade em superfície também ter sido semelhante entre as imagens. Nas áreas irrigadas e de caatinga de grande porte, a ET_{24h} foi superior a 3.2mm, apresentando vários pixels com valores ainda superiores a 5mm.

Como estabelecido na metodologia, visando determinar o volume de água a ser aplicado no perímetro irrigado no decurso de um ano, foram estimadas as evapotranspirações e irrigações sazonais (com períodos entre 13 e 16 dias) para o ano de 2015. Tal como descrito anteriormente (subseção 3.5) cada mês foi dividido em dois períodos, o primeiro com 15 dias e o segundo com os dias restantes.

Os resultados indicaram uma lâmina d'água média estimada de 62,4 m³/s para todo o perímetro irrigado (IE_{SEBAL}), o que remete uma diferença de 23,5 m³/s em relação a IE_{ANA} .

Segundo o Atlas de Abastecimento Urbano de Água - ANA (ANA, 2010), o cenário para demanda hídrica da cidade de Petrolina em 2015, gira em torno dos 985 l/s ou 85 mil m³ por dia. Logo, com os 5,4 milhões de m³ por dia utilizados na irrigação seria possível abastecer a cidade de Petrolina-PE por cerca de 63 dias. Com a expansão urbana e a evolução das áreas irrigadas no polo Petrolina/Juazeiro, a tendência aponta para um aumento no consumo de água.

A Figura 28 apresenta um gráfico para o ano de 2015 das estimativas de evapotranspiração real sazonal acumulada (m³) em todo o polo de irrigação Petrolina/Juazeiro (E_{Tr,s_acum}) e do volume de água (m³) que seria empregado com base na evapotranspiração sazonal, admitindo uma eficiência do uso da água de 80% (I_{s_acum}). Também se faz presente na figura, a IE_{ANA} e a IE_{SEBAL} aplicadas segundo a mesma sazonalidade (m³).

A partir da Figura 28 é possível verificar a amplitude entre a necessidade hídrica total no período sazonal em questão (I_{s_acum}), e a indicada pela IE_{SEBAL} e a IE_{ANA} . Ao que constam os dados, a aplicação de um valor médio como IE_{SEBAL} ou IE_{ANA} , causa um Erro Relativo Médio (ERM) de respectivamente 18 e 35%; ou ainda um Erro Médio Absoluto de respectivamente 14 e 30 milhões de m³.

A I_{s_acum} soma um valor de 1,96 bilhão de m³ durante o ano de 2015, ao passo que a IE_{ANA} indica 1,23 bilhão de m³ neste ano, uma diferença de 710 milhões de m³. A capacidade máxima para o lago sobradinho é de 34 bilhões de m³, segundo o CBHSF (2018), no entanto, seu volume atual é de 4,7% de sua capacidade (1,60 bilhão de m³), um volume que equivale a aproximadamente dez meses de irrigação do polo Petrolina/Juazeiro.

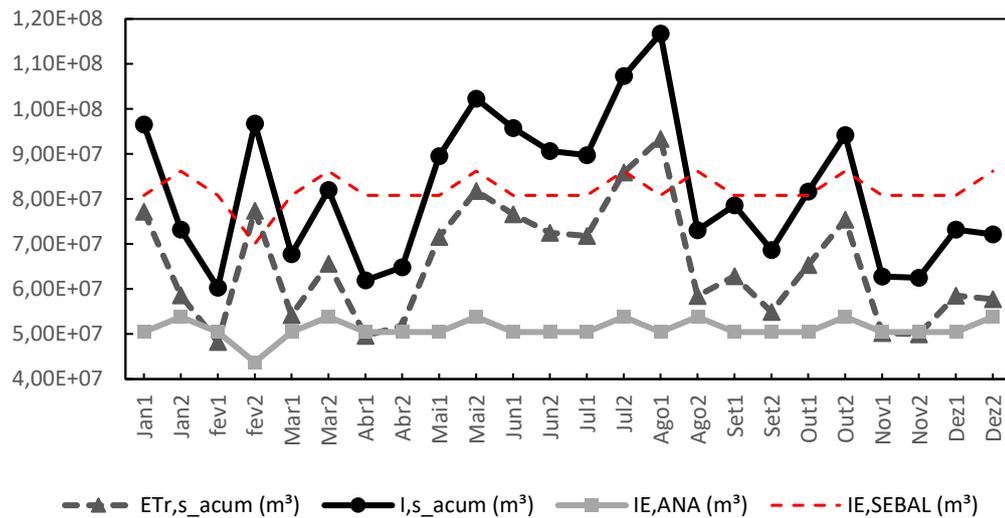


Figura 28: Gráfico sazonal da Evapotranspiração acumulada, ETr,s_acum (m³); Irrigação estimada (m³) e Irrigação aplicada (m³) do polo de irrigação Petrolina/Juazeiro para o ano de 2015

O portal online do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) apresenta as outorgas de direito de uso de recursos hídricos no endereço eletrônico: <http://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/webappviewer/index.html?id=0d9d29ec24cc49df89965f05fc5b96b9> com dados do ano de 2015 (SNIRH, 2018). A Tabela 10 ilustra, segundo estes dados, o volume anual de água extraído do rio São Francisco nos municípios do polo de irrigação Petrolina/Juazeiro, com destino à irrigação, bem como o número de requerentes por município.

Tabela 10: Volume anual de água da outorga de direito de uso de recursos hídricos, com finalidade à irrigação no polo Petrolina/Juazeiro, por município, e número de requerentes da outorga

Município	UF	Número de requerentes	Volume anual (m³)
Petrolina	PE	334	975.586.435,23
Lagoa Grande	PE	147	74.150.154,35
Juazeiro	BA	490	4.210.628.910,13
Casa Nova	BA	442	1.762.033.487,38
Sobradinho	BA	132	117.585.119,18
Curaçá	BA	214	213.799.265,69
Total		1759	7.353.783.372,96

O volume anual total apresentado na Tabela 10, em torno de 7,4 bilhões de m³, indica um valor quase quatro vezes maior que a exigência hídrica estimada para 2015 por esta pesquisa (1,96 bilhão de m³), o suficiente para atingir o volume atual do lago sobradinho (1,60 bilhão de m³) em apenas 3 meses.

Lembrando que a vazão comumente aplicada em 1000 ha é $1\text{m}^3/\text{s}$, nos 73.088 ha encontrados nesta pesquisa a vazão é de $73,1\text{ m}^3/\text{s}$ ou ainda 6,3 milhões de m^3 ao dia. Portanto, em um ano, a soma atinge 2,3 bilhões de m^3 destinados à irrigação. Esse número não representa sequer a metade do que é destinado à outorga para irrigação.

O ultimo desses dados indica o quão distante pode-se estar a necessidade hídrica estimada através desta metodologia da estimada pela ANA (2018) ou da outorgada pela política nacional. Estas informações elucidam a necessidade de monitorar com solicitude a quantidade de água empregada nas irrigações, e ponderar sobre a prioridade no uso da mesma, se seria para irrigação ou para consumo humano, uma vez que o semiárido brasileiro é castigado com secas recorrentes.

5. CONCLUSÕES

Foi possível estimar as componentes do balanço de energia e a evapotranspiração real diária e sazonal por meio de sensoriamento remoto e indicar uma alternativa para realização da outorga de água em perímetros irrigados. Essa estimativa mostrou estar coerente com os valores comumente aplicados nas parcelas irrigadas, ao contrário do que foi explanado pela ANA.

Foi observado que as áreas irrigadas quadruplicaram no polo de irrigação Petrolina/Juazeiro em um espaço de tempo de 30 anos, o que tende a diminuir o albedo da superfície, aumentando assim o saldo de radiação, que por sua vez alimenta o fluxo de calor latente, combustível para o processo de transferência de água para a atmosfera.

No entanto, a radiação solar diária incidente se mostrou determinante para o processo de evapotranspiração, pois mesmo com a maior condição de umidade na superfície na imagem de 24/06/1987 do que em 17/01/2017, a radiação solar incidente na cena de 2017 foi superior, definindo um cenário mais propício ao processo da evapotranspiração.

A área irrigada no polo Petrolina/Juazeiro em 1987 era cerca de 20 mil ha. Com a expansão de aproximadamente 300% ao longo dos últimos 30 anos, a área irrigada encontra-se com 73 mil ha, dos quais em média a vazão de água em m³/s para o dia 17/01/2017 foi de 42,3 m³/s, ou ainda, 3,7 milhões de m³/dia.

Os resultados indicaram uma vazão média estimada para o ano de 2015 de 62,4 m³/s, para todo o perímetro irrigado, com um ERM de 18% e EMA de 14 milhões de m³/s com relação a necessidade hídrica no período sazonal em questão.

Ao longo do ano de 2015 a estimativa da irrigação total acumulada nas parcelas irrigadas foi de 1,96 bilhões de m³ o que representa em dez meses de irrigação o volume atual do lago Sobradinho (1,6 bilhão de m³).

O volume anual de água da outorga com finalidade à irrigação no polo Petrolina/Juazeiro foi de 7,4 bilhões de m³ em 2015, indicando um valor quase quatro vezes maior que a exigência hídrica estimada para 2015 por esta pesquisa (1,96 bilhão de m³), o suficiente para atingir o volume atual do lago sobradinho (1,60 bilhão de m³) em apenas 3 meses.

Estas informações elucidam a necessidade de monitorar a quantidade de água empregada nas irrigações e ponderar sobre a prioridade no uso da mesma, se seria para irrigação ou para consumo humano, uma vez que o semiárido brasileiro é castigado com secas recorrentes.

REFERÊNCIAS DA LITERATURA

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO (FAO. Irrigation and drainage paper, 56). 300p.1998.

ALLEN, R. G., TASUMI, M., TREZZA, R. **SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) – Advanced Training and Users Manual – Idaho Implementation, version 1.0**, 2002.

ALLEN R. G.; TASUMI, M.; MORSE, A; TREZZA. R; WRIGHT, J.L; BASTIAANSSEN, W.; KRAMBER, W.; LORITE, I.; ROBISON, C. W. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – applications. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering-Asce**, v.133, p.395–406, 2007.

ANA. **ATLAS Brasil: Abastecimento Urbano de Água**. Agência Nacional de Águas. Brasília-DF, p. 72. 2010.

ANA. **ATLAS IRRIGAÇÃO: Uso da água na agricultura irrigada**. Agência Nacional de Águas. Brasília-DF, p. 86. 2017a.

ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017: relatório pleno**. Agência Nacional de Águas. Brasília-DF, p. 169. 2017b.

ANA. Demandas Hídricas Consuntivas: Vazão de retirada para irrigação (shapefile). Agência Nacional de Águas. Brasília-DF. Disponível em <<http://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/main.home?uuid=4b9960a4-6436-43d7-9beb-bad256f090fc>>. Acesso em 22 de Janeiro de 2018.

ANDERSON, M. C. et al. Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources. **Remote Sensing of Environment**, v. 122, p. 50-65, 2012.

BARROS, D. Vazão de Sobradinho e Xingó é reduzida até novembro. **Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco - CBHSF**, 2017. Disponível em: <<http://cbhsaofrancisco.org.br/vazao-de-sobradinho-e-xingo-e-reduzida-ate-novembro/>>. Acesso em: 14 Abril 2017.

BASTIAANSEN, W. G. M. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain — A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates**. PhD thesis — Wageningen Agricultural University, The Netherlands ISBN 90-5485-465-0, p. 273. 1995.

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

BASTIAANSEN, W. G. M., MENENTI, M., FEDDES, R. A., HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, v. 212–213, p.198–212. 1998a.

BASTIAANSEN, W. G. M., PELGRUM, H., WANG, J., MA, Y., MORENO, J. F., ROENRINK, G. J., VAN DER WAL, T. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 2. Validation. **Journal of Hydrology**, v. 212, p.213-229. 1998b.

BASTIAANSEN W. G. M.; NOORDMAN E. J.M.; PELGRUM H.; DAVIDS G.; THORESON B. P.; ALLEN R. G. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 131, p. 85–93. 2005.

BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B.; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração diária utilizando-se imagens digitais TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, p. 305-317, 2008.

BRAGA, A.C. **Evapotranspiração e produtividade primária bruta em áreas agrícolas utilizando técnicas de sensoriamento remoto**. Tese (Doutorado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB. p. 122. 2014.

CHANDER, G.; MARKHAM, B.L.; HELDER, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment**, 113, 893–903. 2009.

COELHO, V. H. R.; MONTENEGRO, S.; ALMEIDA, C. N.; SILVA, B. B.; OLIVEIRA, L. M.; GUSMÃO, A. C. V.; FREITAS, E. S. e MONTENEGRO, A. A. A. Alluvial groundwater recharge estimation in semi-arid environment using remotely sensed data. **Journal of Hydrology**, v.548, p.1-15, 2017.

CBHSF. **DELIBERAÇÃO CBHSF Nº 94, de 25 de agosto de 2017**. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Brasília-DF, p. 14. 2017.

CBHSF. **CBHSF em ação - Sobradinho**. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Brasília-DF. Mídia online. Disponível em < <https://www.youtube.com/watch?v=mFPSJrx-XqA>> Acesso em 10 de Fevereiro de 2018.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DOS VALES DO SÃO FRANCISCO E DO PARNAÍBA – CODEVASF. Perímetros irrigados: Juazeiro/Petrolina. Brasília. 2010. Disponível em: <<http://www.codevasf.gov.br/principal/perimetros-irrigados/polos-de-desenvolvimento-1/juazeiro-petrolina>>. Acesso em: 09 de fevereiro de 2017.

DUARTE, H. F.; DIAS, N. L.; MAGGIOTTO, S. R. Assessing daytime downward longwave radiation estimates for clear and cloudy skies in Southern Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 139, p. 171–181, 2006.

FARAH H. O.; BASTIAANSEN W. G. M. Impact of spatial variations of land surface parameters on regional evaporation: a case study with remote sensing data. **Hydrological Processes** 15: 1585–1607. 2001.

GANGOPADHYAYA, M.; URYAEV, V. A.; OMAR, M. H.; NORDENSEN, T. J.; HARBECK, G. E. **Measurement and estimation of evaporation and evapotranspirations**. **Organização Meteorológica Mundial**, Genebra, 1966 (Technical note, 83).

GARRISON J. D.; ADLER G. P. Estimation of precipitable water over the United States for application to the division of solar radiation into its direct and diffuse components. **Solar Energy** 44: 225–241. 1990.

IDAHO DEPARTMENT OF WATER RESOURCES - IDWR. Mapping Evapotranspiration. Disponível em: < <https://www.idwr.idaho.gov/GIS/mapping-evapotranspiration/> >. Acesso em 10 de agosto de 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. Estações Automáticas. Brasília. Disponível em: < <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas> >. Acesso em: 09 de fevereiro de 2017.

KUSTAS, W. P.; NORMAN, J.M.; ANDERSON, M. C.; FRENCH, A. N. Estimating subpixel surface temperatures and energy fluxes from the vegetation index–radiometric temperature relationship. **Remote sensing of environment**. v. 85, p. 429-440, 2003.

LANDSAT. National Aeronautics and Space Administration. 2013. Disponível em: <<http://landsat.gsfc.nasa.gov/>>. Acesso em 10 de junho de 2017.

Land Processes Distributed Active Archive Center - LP DAAC. MODIS Products Table. Disponível em: < https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table >. Acesso em 20 de novembro de 2016.

LESLIE, C. R.; SERBINA, L. O. e MILLER, H. M. Landsat and Agriculture—Case Studies on the Uses and Benefits of Landsat Imagery in Agricultural Monitoring and Production: U.S. Geological Survey Open-File Report 2017–1108, p. 27. 2017. <https://doi.org/10.3133/ofr20171034>

LI, S.; ZHAO, W. Satellite-based actual evapotranspiration estimation in the middle reach of the Heihe River Basin using the SEBAL method. **Hydrological Processes**, v. 24, n. 23, p. 3337-3344, 2010.

MACHADO, C. C.; SILVA, B. D.; DE ALBUQUERQUE, M. B.; GALVÍNCIO, J. D. Estimativa do balanço de energia utilizando imagens TM-Landsat 5 e o algoritmo SEBAL no litoral sul de Pernambuco. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 1, p. 55-67, 2014.

MARENGO, J. A. et al. Two Contrasting Severe Seasonal Extremes in Tropical South America in 2012: Flood in Amazonia and Drought in Northeast Brazil. **Journal of climate**, v.26, p.9137-9154, 2013.

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v.1, p.1-12, 2016.

MOREIRA, L. C. J.; DURAND, B. J.; TEIXEIRA, A. S.; ANDRADE, E. M. Variabilidade local e regional da evapotranspiração estimada pelo algoritmo SEBAL. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 6, p. 1148-1159, 2010.

NICÁCIO, R. M. **Evapotranspiração real e umidade do solo usando dados de sensores orbitais e a metodologia SEBAL na bacia do rio São Francisco**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p.320. 2008.

NORMAN J.M.; KUSTAS W. P.; HUMES K. S. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. **Agricultural and Forest Meteorology** v. 77, p. 263–293. 1995

OLIVEIRA, L. M. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, B. B.; ANTONIO, A. C. D.; MOURA, A. E. S. S. Evapotranspiração real em bacia hidrográfica do Nordeste brasileiro por meio do SEBAL e produtos MODIS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.10, p.1039–1046, 2014.

PACE, F. T. DI. **Estimativa do Balanço de Radiação à Superfície Terrestre Utilizando Imagens do TM-Landsat 5 e Modelo de Elevação Digital**. (Tese de doutorado). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB. 2005.

ROERINK, G. J.; SU, Z.; MENENTI, M. A Simple Remote Sensing Algorithm to Estimate the Surface Energy Balance. **Physics and Chemistry of the Earth (B)**, v. 25, p. 147-157, 2000.

SERBINA, L.; MILLER, H.M. Landsat uses and benefits—Case studies by application area: U.S. Geological Survey Open-File Report 2014–1108, p. 61. 2014 <http://dx.doi.org/10.3133/ofr20141108/>.

SHILPAKAR, R.; BASTIAANSEN, W.G.M.; MOLDEN, D. **A remote sensing-based approach for water accounting in the East Rapti River Basin, Nepal** *Himalayan J. Sci.*, 7 (9) (2011).

SILVA, B. B.; BRAGA, A. C.; BRAGA, C.C.; OLIVEIRA, L. M. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA JUNIOR, B. B. Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v.20, n.1, p.3-8, 2016.

SILVA, B. B.; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C.; Oliveira, L. M. M.; GALVÍNCIO, J. D.; Montenegro, S. M. G. L. Evapotranspiração e estimativa da água consumida em perímetro irrigado do semiárido brasileiro por sensoriamento remoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 47, p. 1218-1226, 2012.

SILVA, A. M.; SILVA, R. M.; SILVA, B. B. Determinação de temperatura da superfície e estimativa do saldo de radiação e evapotranspiração usando imagens Landsat e dados observados. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 67, p. 1203-1216, 2015 (a).

SILVA, B.B.; SILVA, V.P.R.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; ROCHA, H.R.; OLIVEIRA, L.M.M. Determination of instantaneous and daily net radiation from TM - Landsat 5 data in a subtropical watershed. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**. v. 135, p. 42-49, 2015 (b)

SILVA, B. B.; WILCOX, B. P.; SILVA, V. D. P. R.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; OLIVEIRA, L. M. M. Changes to the energy budget and evapotranspiration following conversion of tropical savannas to agricultural lands in São Paulo State, Brazil. **Ecohydrology**, v.8, n.7, p.1272–1283, 2014.

SILVA, M. A. V. **Meteorologia e climatologia**. (Versão Digital). Recife/PE: INMET. v. 2, p. 463. 2006.

SILVA, P. C. G. D. **Projetos de Irrigação e o desenvolvimento do Submédio do Vale São Francisco**. Projetos de Irrigação e o desenvolvimento do Submédio do Vale São Francisco. Juazeiro-BA: I Semana de Ciências Sociais na UNIVASF, p.69-78, 2012.

LANDSAT. National Aeronautics and Space Administration. 2013. Disponível em: <<http://landsat.gsfc.nasa.gov/>>. Acesso em 10 de junho de 2017.

SNIRH. Outorgas de Direito de Uso de Recursos Hídricos. 2015. Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. Disponível em: <<http://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/webappviewer/index.html?id=0d9d29ec24cc49df89965f05fc5b96b9>>. Acesso em 04 de março de 2018.

SUOMI, V. E.; TANNER, C. B. Evaporation estimates from heat budget measurements over a field crop. *Transactions, American Geophysical Union*, 2: 298-304, 1968.

TASUMI, M. **Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery**. PhD thesis, Dept. Biological and Agricultural Engineering, University of Idaho. Idaho, 2003.

TASUMI M.; ALLEN R. G. Satellite-based ET mapping to assess variation in ET with timing of crop development. **Agricultural Water Management**. v. 88, p. 54–62. 2007

TEIXEIRA A. H. C; BASTIAANSSEN W. G. M; AHMADD M. D.; BOS M. G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil part A: calibration and validation. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 149, p. 462–476. 2009a.

TEIXEIRA A. H. C; BASTIAANSSEN W. G. M; AHMADD M. D.; BOS M. G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil. Part B: application to the regional scale. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 149, p. 477–490. 2009b. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.09.014>.

TEIXEIRA, A. H. de C.; SCHERER-WARREN, M.; HERNANDEZ, F.B.T.; ANDRADE, R.G.; LEIVAS, J.F. Large-Scale Water Productivity Assessments with MODIS Images in a Changing Semi-Arid Environment: A Brazilian Case Study. **Remote Sensing**, v. 5, p. 5783-5804, 2013a. <http://dx.doi.org/10.3390/rs5115783>.

USGS - United States Geological Survey. Landsat Update. Vol. 7 Issue 5, 2013. Disponível em: https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/about_LU_Vol_7_Issue_5.pdf. Acessado em: 12 de abril de 2017.

VERMOTE R. W. E. MOD09GQ MODIS/Terra Surface Reflectance Daily L2G Global 250m SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC (2015). Disponível em: <https://doi.org/10.5067/modis/mod09gq.006>. Acesso em 30 de julho de 2017.

WAN, S. H. Z. MOD11A1 MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5067/modis/mod11a1.006>. Acesso em 30 de julho de 2017.

WANG, J.; KIMURA R. E BASTIAANSEN, W. Monitoring ET with remote sensing and the management of water resources on a basin scale. **11th CReS International Symposium on Remote Sensing**, Chiba, Japão. 2005.

WARREN, M. S. **Metodologia para a construção de séries temporais de evapotranspiração por técnicas de sensoriamento remoto**. (Tese de doutorado). Universidade de Brasília. Brasília, DF. p. 168. 2011.

WARREN, M. S.; TEIXEIRA, A. H. C.; RODRIGUES, L. N.; HERNANDEZ, F. B. T. Utilização do Sensoriamento Remoto Termal na Gestão de Recursos Hídricos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 07, n. 1, p. 066-082, 2014.