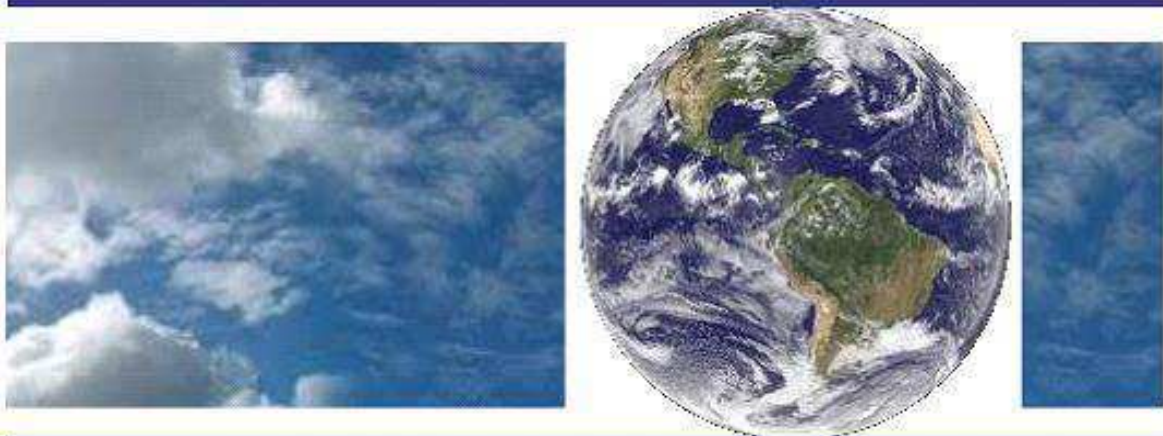


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
METEOROLOGIA**



TESE DE DOUTORADO

Alexandra Chaves Braga

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO E PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA
BRUTA EM ÁREAS AGRÍCOLAS UTILIZANDO TÉCNICAS DE
SENSORIAMENTO REMOTO**

Campina Grande, Abril 2014



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



TESE DE DOUTORADO

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO E PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA BRUTA EM ÁREAS
AGRÍCOLAS UTILIZANDO TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO**

ALEXANDRA CHAVES BRAGA

**Orientadores: Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva
Profa. Dra. Célia Campos Braga**

Campina Grande – PB
Abril de 2014

ALEXANDRA CHAVES BRAGA

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO E PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA BRUTA EM ÁREAS
AGRÍCOLAS UTILIZANDO TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento às exigências para a obtenção do grau de Doutor em Meteorologia.

Área de concentração: **Meteorologia Agrícola e Micrometeorologia**

Subárea: **Sensoriamento Remoto Aplicado**

Orientadores: Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva

Profa. Dra. Célia Campos Braga

Campina Grande – PB

Abril de 2014

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

B813e Braga, Alexandra Chaves.

Evapotranspiração e produtividade primária bruta em áreas agrícolas utilizando técnicas de sensoriamento remoto / Alexandra Chaves Braga. – Campina Grande, 2014.

121 f. : il.

Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro Ciências e Tecnologia, 2014.

"Orientação: Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva, Prof.^a Dr.^a Célia Campos Braga".

Referências.

1. Balanço de Radiação. 2. Fluxo de Calor Latente. 3. Landsat 5. 4. Landsat 8. 5. Albedo. I. Silva, Bernardo Barbosa da. II. Braga, Célia Campos. III. Título.

CDU 551.502.5(043)

ALEXANDRA CHAVES BRAGA

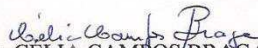
EVAPOTRANSPIRAÇÃO E PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA BRUTA EM ÁREAS
AGRÍCOLAS UTILIZANDO TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO

TESE APROVADA EM 15/04/2014

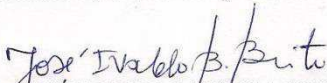
BANCA EXAMINADORA



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



Profa. Dra. CELIA CAMPOS BRAGA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



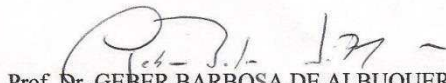
Prof. Dr. JOSÉ IVALDO BARBOSA DE BRITO
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Profa. Dra. JANAINA BARBOSA DA SILVA
Unidade Acadêmica de Geografia
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. GEBER BARBOSA DE ALBUQUERQUE MOURA
Departamento de Agronomia
Universidade Federal Rural de Pernambuco

DEDICATÓRIA

Dedico primeiramente a Deus, por tudo de bom que Ele representa. Aos meus pais, Iris Bezerra de Albuquerque Chaves e Alexandre Braga (in memorian), aos meus irmãos Rodrigo Chaves Braga e Amanda Chaves Braga, ás minhas filhas Ana Clara Braga e Júlia Braga, razão do meu viver, aos meus sobrinhos Alexandre Braga Filho e Alana Belarmino, ao meu marido Jack Garcia de Medeiros Neto por sua dedicação, carinho e esforço, grandes incentivadores, mestres nos ensinamentos da vida e a todos que direta ou indiretamente contribuíram para conclusão de mais esta etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo que Ele representa na minha vida e por ter me proporcionado condições para conseguir alcançar meu ideal, dando-me forças para vencer todos os obstáculos.

Ao prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva, o meu sincero reconhecimento pela oportunidade de realizar este trabalho ao lado de alguém que transpira sabedoria; meu respeito e admiração pela sua serenidade e pelo seu Dom no ensino da Ciência, inibindo sempre a vaidade em prol da simplicidade e eficiência. Já dizia São Francisco de Assis: comece fazendo o que é necessário, depois o que é possível e de repente você estará fazendo o impossível. Muito obrigada por sua dedicação durante todo o período da minha pós-graduação, Mestrado e Doutorado fazendo com que eu realizasse o que parecia impossível.

À profa. Dra. Célia Campos Braga, pela amizade, pela dedicação, pela orientação e assistência durante esse período.

Aos funcionários do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, em especial a Divanete C. Rocha, pela atenção, pela dedicação e pela disposição com que sempre nos trataram durante nossa caminhada.

Ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, pela oportunidade e pela confiança depositada.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de nível Superior – CAPES, pela bolsa concedida para realização desse doutorado.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia e, de maneira especial, a Dra. Célia Campos Braga, Dr. José Ivaldo Barbosa de Brito, Dr. Francisco de Assis Salviano de Sousa, Dr. Enio Pereira da Sousa, Dr. Bernardo Barbosa da Silva, pelos ensinamentos e pela indispensável colaboração com a nossa formação profissional.

Aos amigos Argemiro Araújo, Edicarlos Sousa, Francineide Amorim, Sonaly Oliveira e Valéria Borges pela amizade, paciência e ensinamentos durante este período.

Ao INMET – Instituto Nacional de Meteorologia pelos dados meteorológicos fornecidos e a Unidade de Ciências Atmosférica da Universidade Federal de Campina Grande pela infraestrutura disponibilizada.

À toda minha família, de modo especial às minhas filhas e ao meu marido que ficaram sem a minha companhia vários momentos; às minhas irmãs, minhas mães e minha avó por não ter tido muitas vezes condições de estar com vocês em datas importantes. Ao meu irmão que mesmo distante me passava segurança, quando muitas vezes quis cair.

Aos meus amigos e colegas de trabalho por conviverem comigo num período de grande estresse e nunca me deixaram sem dar boas risadas.

E, finalmente, a todos que de forma direta ou indireta colaboraram com a conclusão deste trabalho. A todos, enfim, o meu MUITO OBRIGADA.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	iv
LISTA DE SÍMBOLOS.....	vi
RESUMO.....	ix
ABSTRACT.....	x
1 - INTRODUÇÃO.....	20
2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
2.1 - Sensoriamento remoto.....	23
2.1.1 - MODIS-Terra.....	25
2.2 - Métodos de determinação da evapotranspiração.....	26
2.2.1 - Balanço de energia baseado via Razão de Bowen.....	27
2.2.2 - Balanço de energia via correlações turbulentas.....	28
2.3 - Balanço de energia via sensoriamento remoto.....	29
2.3.1 - Algoritmo SEBAL.....	29
2.3.2 - Algoritmo METRIC.....	30
2.4 - Bacia hidrográfica do Piranhas-Açu.....	32
2.4.1 - Perímetro Irrigado de São Gonçalo.....	33
2.5 - Produtividade Primária Bruta - GPP.....	34
3 - MATERIAL E MÉTODOS.....	36
3.1 - Materiais empregados.....	36
3.1.1 - Área geográfica de estudo.....	36
3.1.2 - Caracterização edafoclimática da área.....	36
3.1.3 - Imagens de satélite utilizadas.....	38
3.1.3.1 - Imagens TM - Landsat 5.....	38
3.1.3.2 - Imagens OLI/TIRS – Landsat 8.....	39
3.1.3.3 - Imagens MODIS – Terra.....	40
3.1.3.4 - Imagens do MED - SRTM.....	40
3.2 - Métodos empregados no balanço de energia.....	40
3.2.1 - Saldo de radiação com o SEBAL.....	40
3.2.1.1 - Determinação do albedo.....	41
3.2.1.2 - Radiação solar global incidente via SEBAL.....	42
3.2.1.3 – Radiação de onda longa incidente via SEBAL.....	42

3.2.1.4 – Radiação de onda longa emitida via SEBAL.....	43
3.2.2 – Saldo de radiação com o METRIC.....	43
3.2.2.1 - Determinação do albedo com o METRIC	44
3.2.2.2 – Radiação solar global incidente no METRIC.....	46
3.2.2.3 – Radiação de onda longa incidente no METRIC.....	46
3.2.2.4 – Radiação de onda longa emitida pelo METRIC.....	46
3.2.3 - Fluxo de calor no solo com o SEBAL/METRIC.....	47
3.2.4 – Fluxo de calor sensível no SEBAL/METRIC.....	48
3.2.4.1 - Determinação da resistência aerodinâmica.....	49
3.2.4.2 - Determinação das constantes da função do dT.....	51
3.2.4.3 - Determinação do dT e H no SEBAL.....	51
3.2.4.4 - Determinação do dT e H no METRIC.....	52
3.2.5 - Fluxo de calor latente no SEBAL/METRIC.....	55
3.2.6 – Evapotranspiração diária com o SEBAL/METRIC.....	55
3.2.6.1 - Evapotranspiração diária com o SEBAL.....	55
3.2.6.2 - Evapotranspiração diária com o METRIC.....	56
3.2.7 - Mapa da evapotranspiração mensal.....	56
3.2.8 - Validação da evapotranspiração SEBAL/METRIC.....	57
3.3 - Método de cômputo da produtividade primária bruta.....	57
3.4 – Validação dos resultados: análise de erros.....	59
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	60
4.1 – Resultados dos balanços de radiação e energia.....	60
4.1.1 – Mapas temáticos do albedo à superfície.....	60
4.1.2 - Mapas temáticos da temperatura da superfície.....	66
4.1.3 - Mapas temáticos do índice de vegetação.....	70
4.1.4 - Mapas temáticos do saldo de radiação à superfície.....	75
4.1.5 – Impacto da topografia no balanço radiativo na bacia do Alto Piranhas.....	77
4.1.6 - Mapas temáticos da fração evaporativa.....	83
4.1.7 - Mapas temáticos da evapotranspiração diária.....	87
4.1.8 – Análise das imagens da evapotranspiração MODIS.....	92
4.1.9 – Quantificação do volume de água do Perímetro Irrigado.....	94
4.2 – Mapas temáticos da produtividade primária bruta.....	97
4.3 - Validação dos resultados.....	104
5 - CONCLUSÕES.....	106
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Bacia do Alto Piranhas com destaque para o mapa de uso do solo do PISG I ano 2008.....	34
Figura 3.1 - Recorte de imagem OLI do Landsat 8 do dia 12 de setembro de 2013 em composição RGB453 com destaque para o PISG I (cor branco) e II (cor azul).....	37
Figura 3.2 – Diagrama com etapas computacionais do processamento de obtenção do saldo de radiação à superfície – Rn por meio do SEBAL.....	41
Figura 3.3 - Diagrama com etapas computacionais do processamento de obtenção do saldo de radiação à superfície – Rn por meio do METRIC.....	44
Figura 3.4 - Diagrama para o cálculo da radiação solar em superfícies inclinadas.....	47
Figura 3.5 – Fluxograma das etapas computacionais do processo iterativo para obtenção do fluxo de calor sensível –H pelo SEBAL/METRIC.....	50
Figura 3.6 - Fluxograma para o cômputo da GPP.....	59
Figura 4.1 - Mapas temáticos do albedo de superfície obtidos dos produtos Landsat 5 no PISG referentes aos dias selecionados para a pesquisa em 2008.....	62
Figura 4.2 - Mapas temáticos do albedo de superfície obtidos dos produtos Landsat 5 no PISG referentes aos dias selecionados para a pesquisa em 2013.....	63
Figura 4.3 - Comportamento do albedo de superfície e a temperatura de superfície referente aos dias selecionados para pesquisa: A) coqueiro; B) arrozeiro; C) vegetação nativa.....	64
Figura 4.4 – Mapas temáticos do albedo da superfície obtidos dos produtos Landsat 5 e Landsat 8 no PISG nos anos de 2008 e 2013.....	65
Figura 4.5 – Mapas temáticos o da temperatura da superfície obtidos com o TM – Landsat 5 no PISG referente aos dias selecionados para a pesquisa em 2008.....	67
Figura 4.6 – Mapas temáticos o da temperatura da superfície obtidos com o OLI/TIRS - Landsat 8 no PISG referente aos dias selecionados para a pesquisa em 2013.....	68

Figura 4.7 - Mapas temáticos da temperatura de superfície obtidos dos produtos Landsat 5 e Landsat 8 no PISG nos anos de 2008 e 2013.....	69
Figura 4.8 – Comportamento do IVDN e precipitação para os períodos secos e chuvosos da região estudada em três tipos de alvo do PISG	71
Figura 4.9 – Correlação do IVDN e precipitação para os períodos secos e chuvosos da região estudada em A) coqueiro; B) arrozeiro; C) vegetação nativa.....	71
Figura 4.10 - Mapas temáticos NDVI obtidos dos produtos Landsat 5 referentes aos dias selecionados para pesquisa no ano de 2008.....	72
Figura 4.11 - Mapas temáticos NDVI obtidos dos produtos Landsat 8 referentes aos dias selecionados para pesquisa no ano de 2013.....	73
Figura 4.12 - Mapas temáticos do IVDN obtidos dos produtos Landsat 5 e Landsat 8 no PISG nos anos de 2008 e 2013.....	74
Figura 4.13 - Mapas temáticos do saldo de radiação à superfície obtidos pelo TM - Landsat 5 referentes aos dias selecionados para pesquisa no ano de 2008.....	78
Figura 4.14 - Mapas temáticos do saldo de radiação à superfície obtidos com o OLI/TIRS - Landsat 8 referentes aos dias selecionados para pesquisa no ano de 2013.....	79
Figura 4.15 – Relação entre o albedo e o saldo de radiação à superfície referentes aos dias selecionados para pesquisa.....	80
Figura 4.16 – Mapa do saldo de radiação (Wm^{-2}) obtido pelo SEBAL/METRIC e radiação solar instantânea (Wm^{-2}) para o dia 01 de novembro de 2008.....	81
Figura 4.17 – Mapa do saldo de radiação (Wm^{-2}) obtido pelo SEBAL/METRIC com o OLI/TIRS e radiação solar instantânea (Wm^{-2}) para o dia 14 de outubro de 2013.....	82
Figura 4.18 - Mapas temáticos da fração evaporativa obtidos dos produtos Landsat 5 referentes aos dias selecionados para pesquisa no ano de 2008.....	84
Figura 4.19 - Mapas temáticos da fração evaporativa obtidos dos produtos Landsat 8 referentes aos dias selecionados para pesquisa no ano de 2013.....	85
Figura 4.20 - Mapas temáticos da fração evaporativa obtidos dos produtos Landsat 5 e Landsat 8 no PISG nos anos de 2008 e 2013.....	86
Figura 4.21 - Mapas temáticos da evapotranspiração obtidos dos produtos Landsat 5 referentes aos dias selecionados para pesquisa no ano de 2008.....	89
Figura 4.22 - Mapas temáticos da evapotranspiração obtidos dos produtos Landsat 8 referentes aos dias selecionados para pesquisa no ano de 2013.....	90
Figura 4.23 - Mapas temáticos da evapotranspiração obtidos dos produtos Landsat 5 e	

Landsat 8 no PISG nos anos de 2008 e 2013.....	91
Figura 4.24 - Mapas temáticos da evapotranspiração obtidos dos produtos MOD16 no PISG referentes aos dias selecionados para pesquisa no ano de 2008.....	93
Figura 4.25 – Representação gráfica do volume água armazenada nos últimos 12 meses do açude de São Gonçalo-PB.....	96
Figura 4.26 - Representação gráfica da evolução do volume armazenado nos últimos 10 anos do açude de São Gonçalo-PB.....	96
Figura 4.27 - Mapas temáticos da produtividade primária bruta, obtidos pelo TM – Landsat 8 no PISG referente aos dias selecionados para pesquisa em 2008.....	98
Figura 4.28 - Mapas temáticos da produtividade primária bruta, obtidos pelo OLI/TIRS – Landsat 8 no PISG referente aos dias selecionados para pesquisa em 2008.....	99
Figura 4.29 - Mapas temáticos da produtividade primária bruta obtidos dos produtos Landsat 5 e Landsat 8 no PISG nos anos de 2008 e 2013.....	100
Figura 4.30 - Mapas temáticos da produtividade primária bruta obtida dos produtos MOD17A2 no PISG referente aos dias selecionados para pesquisa.. em 2008.....	101
Figura 4.31 - Mapas temáticos da produtividade primária bruta obtida dos produtos MOD17A2 no PISG referente aos dias selecionados para pesquisa.. em 2008.....	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Resumo do programa Landsat 5.....	22
Tabela 2.2 - Especificação das bandas do satélite MODIS-Terra.....	24
Tabela 3.1 – Precipitação média – PM (mm) e desvio padrão – DP (mm), temperatura do ar média mensal – Ta (°C), temperaturas máxima e mínima Ta (°C) segundo registros da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas da UFCG.....	37
Tabela 3.2 - Coeficientes de calibração do TM - Landsat 5 a_b e b_b , irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera – k_b empregados na conversão da refletância monocromática em albedo e algumas características das bandas espectrais....	38
Tabela 3.3 - Coeficientes de calibração do OLI - Landsat 8 a_b e b_b , irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera – k_b empregados na conversão da refletância monocromática em albedo.....	39
Tabela 3.4 - Constantes de calibração $C_1 - C_5$ e C_b do Landsat 5 – TM.....	46
Tabela 3.5 - Variáveis de entrada para o cálculo do saldo de radiação – Rn, distância relativa Terra / Sol – dr, declinação do Sol – δ , ângulo horário instantâneo – ω , cosseno do ângulo zenital solar – $\cos Z$, pressão de vapor d'água - e_a e temperatura do ar - T_a referentes ao instante da passagem do satélite nos dias selecionados para pesquisa.....	47
Tabela 3.6 - Valores da velocidade do vento aos níveis de 10 e 200 metros.....	50
Tabela 3.7 - Valores da radiação solar diária por ocasião das datas em que foram geradas as imagens TM – Landsat 5 ano 2008 e Oli/TIRS – Landsat 8 ano 2013.....	58
Tabela 3.8 – Datas das imagens do TM e OLI/TIRS, valores da T_{opt} (°C), T_{mon} (°C) T_1 e T_2 referentes as dias selecionados para pesquisa.....	58
Tabela 4.1 – Datas das imagens do TM e OLI/TIRS, transmissividade atmosférica – τ_{oc} , temperatura do ar – T_{ar} (°C), Pressão atmosférica – Pa(KPa), radiação de onda atmosfera na direção da superfície – $R_{ol,atm}$ (Wm^{-2}), radiação solar instantânea incidente – $R_{s,inc}$ (Wm^{-2}) nos dias selecionados para a pesquisa.....	83
Tabela 4.2 – Datas das imagens, evapotranspiração de referência - ET_o (mm), albedo - α adimensional), saldo de radiação diário - R_{n24h} ($W m^{-2}$) e evapotranspiração real diária SEBAL - ET_{sebal} , e evapotranspiração segundo FAO-56 (E_{TFAO}) - (mm) referentes aos dias selecionados para a pesquisa.....	94

Tabela 4.3 - Meses de maior demanda de água para as irrigações no PISG – Mês, Área total irrigada – ATI (ha), evapotranspiração de referência FAO-56 mensal – ETo_mensal (mm), evapotranspiração real acumulada mensal – ETr_acum (mm) no PISG, razão entre a ETr acumulada mensal e a ETo acumulada mensal – RETr_ETo, volume total evapotranspirado mensalmente – Vol_ETr (m³) no PISG, e volume total de água aplicado mensalmente - Vol_Tot_Apli (m³) no PISG, no ano de 2008..... 95

Tabela 4.4 - Meses de maior demanda de água para as irrigações no PISG – Mês, Área total irrigada – ATI (ha), evapotranspiração de referência FAO-56 mensal – ETo_mensal (mm), evapotranspiração real acumulada mensal – ETr_acum (mm) no PISG, razão entre a ETr acumulada mensal e a ETo acumulada mensal – RETr_ETo, volume total evapotranspirado mensalmente – Vol_ETr (m³) no PISG, e volume total de água aplicado mensalmente - Vol_Tot_Apli (m³) no PISG, no ano de 2013..... 95

Tabela 4.5 – Datas das imagens do TM e OLI/TIRS, ângulo zenital do Sol – Z(graus), quadrado da razão entre a distância Terra-Sol e seu valor médio – dr, cosseno de Z – cos Z, temperatura do ar – T_a (°C), umidade relativa do ar – UR (%), pressão atmosférica – P_o (KPa), radiação fotossinteticamente ativa – RFA (Wm⁻²) e transmitância atmosférica - $\tau_{oc,ins}$ no momento da passagem do satélite na área de estudo referentes aos dias selecionados para a pesquisa..... 103

Tabela 4.6 – Datas das imagens do TM e OLI/TIRS, GPP segundo imagens TM - GPP_{TM} (g C m⁻² dia⁻¹), GPP segundo imagens OLI/TIRS – GPP_{OLI/TIRS} (g C m⁻² dia⁻¹), GPP segundo o produto MOD17 – GPP_{MOD} (g C m⁻² dia⁻¹), GPP médio no PISG – GPP_{médio} (g C m⁻² dia⁻¹), GPP integrado em toda área irrigada do PISG – GPP_{PISG} (ton C dia⁻¹) referentes aos dias selecionados para a pesquisa..... 103

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

Símbolo	Descrição	Unidade
α	Albedo da superfície	Adimensional
α_{toa}	Albedo no topo da atmosfera	Adimensional
β	Razão de Bowen	Adimensional
γ	Fator psicrométrico	kPa °C ⁻¹
Δe	Gradiente de pressão de vapor d'água acima do dossel	Adimensional
ΔT	Gradiente de temperatura do ar acima do dossel	Adimensional
ε	Eficiência do uso da luz	gr C MJ ⁻¹
ε_a	Emissividade da atmosfera	Adimensional
ε_{NB}	Emissividade da superfície na banda termal	Adimensional
ε_0	Emissividade da superfície em larga banda	Adimensional
ρ	Densidade do ar	kg m ⁻³
ρ_λ	Reflectância espectral	Adimensional
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	W m ⁻² K ⁴
τ_{oc}	Transmissividade da atmosfera	Adimensional
Ψ_m	Fator de correção de estabilidade para transporte de momentum	-
Ψ_h	Fator de correção de estabilidade para transporte de calor	-
BERB	Balanço de Energia pela Razão de Bowen	-
c_p	Calor específico do ar à pressão constante	kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹
$\cos\theta$	Cosseno do ângulo zenital do Sol	Adimensional
d_r	Inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol	Adimensional
d_w	Índice de concordância de Wilmott	Adimensional
e	Pressão de vapor d'água	kPa
ET	Evapotranspiração	mm dia ⁻¹
ET ₀	Evapotranspiração de referência	mm dia ⁻¹
ET _{BERB}	Evapotranspiração da cultura determinada pelo BERB	mm dia ⁻¹
ET _r	Evapotranspiração da cultura determinada pelo método FAO-56	mm dia ⁻¹
ET _{SEBAL}	Evapotranspiração da cultura determinada pelo SEBAL	mm dia ⁻¹
FE	Fração evaporativa	mm dia ⁻¹ .
GPP	Produtividade Primária Bruta	g C m ⁻² dia ⁻¹
G	Fluxo de calor no solo	W m ⁻²

H	Fluxo de calor sensível	$W m^{-2}$
IVDN	Índice de vegetação da diferença normalizada	Adimensional
IVAS	Índice de vegetação ajustado para efeitos do solo	Adimensional
IAF	Índice de área foliar	$m^{-2} m^{-2}$
k	Constante de Von Karman	-
Kc	Coefficiente de cultivo	Adimensional
L	Comprimento de Monin-Obukhov	M
LE	Fluxo de calor latente	$W m^{-2}$
L_v	Calor latente de vaporização	$kJ kg^{-1}$
L_λ	Radiância espectral monocromática	$Wm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$
METRIC	Mapping Evapotranspiration at high Resolution with Internalized Calibration	-
P	Pressão atmosférica	kPa
PISG	Perímetro Irrigado de São Gonçalo	-
R^2	Coefficiente de determinação da regressão linear	Adimensional
Ra	Radiação no topo da atmosfera	$W m^{-2}$
r_{ah}	Resistência aerodinâmica ao transporte de calor	$s m^{-1}$
$R_{ol,em}$	Radiação de onda longa emitida pela superfície	$W m^{-2}$
$R_{ol,inc}$	Radiação de onda longa incidente	$W m^{-2}$
$R_{onc,inc}$	Radiação de onda curta incidente	$W m^{-2}$
RCT	Razão de consumo total	Adimensional
Rn	Saldo de radiação	$W m^{-2}$
SEBAL	Surface Energy Balance Algorithm for Land	-
Ta	Temperatura do ar	$^{\circ}C / K$
T_s	Temperatura da superfície	$^{\circ}C / K$
u_x	Velocidade do vento na altura x	$m s^{-1}$
u^*	Velocidade de fricção	$m s^{-1}$
Z_{om}	Coefficiente de rugosidade ao transporte de momentum	M
W	Água precipitável	Mm
LDCM	Landsat Data Continuity Mission	
MODIS	Moderate resolution imaging spectro radiometer	
SR	Sensoriamento Remoto	
DNOCS	Departamento nacional de obras contra a seca	

INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
UFCG	Universidade Federal da Paraíba
AESA	Agência Estadual de Gestão da água
SEBS	Surface Energy Balance System
S-SEBI	Simplified Surface Energy Balance Index
SEBTA	Surface Energy Balance with Topography Algorithm
MED	Modelo de elevação digital
OLI	Operation Land Imager
TIRS	Termal Infrared Sensor
USGS	United States Geological Survey
TM	Thematic Mapper

RESUMO

A utilização da água na agricultura é um tema que vem sendo discutido pela comunidade científica mundial, principalmente por ser uma das atividades humanas que mais consome água em nosso planeta. Neste sentido, este trabalho tem por objetivo determinar a evapotranspiração real - ETr e o volume de água consumido nas áreas irrigadas do Perímetro Irrigado de São Gonçalo (PISG) na Paraíba, como também a produtividade primária bruta – GPP, utilizando técnicas de sensoriamento remoto. Para tanto, foram determinados os balanços de radiação e energia por meio de imagens TM - Landsat 5 e OLI/TIRS - Landsat 8 utilizando a metodologia do SEBAL/METRIC e imagens MODIS-Terra para validação dos resultados da GPP. Avaliou-se o impacto da topografia no saldo radiativo e foram selecionados três alvos para validação dos resultados. Foram selecionadas cinco imagens do TM e cinco do OLI/IRTS dos anos de 2008 e 2013, respectivamente. O albedo da superfície foi obtido por meio do SEBAL e também do METRIC e se constatou que o METRIC promove uma correção atmosférica excessiva, ocasionando subestimativa do albedo. As áreas de topografia muito acentuada apresentam grande variabilidade na radiação solar global instantânea, impactando diretamente o saldo de radiação. Ficou evidenciado que o saldo de radiação obtido com imagens Landsat 8 foi substancialmente inferior ao obtido com imagens Landsat 5, muito provavelmente ocasionado por problemas de calibração nos sensores OLI e TIRS, principalmente nas bandas termais. Os erros absoluto e relativo médios, bem como a Raiz do Erro Quadrático Médio associados aos valores da ETr obtidos com o SEBAL e a ETr FAO-56 nas imagens Landsat ficaram bem abaixo dos obtidos com imagens Landsat 8, o que pode ser associados a problemas de calibração e, possivelmente, da seca ocorrida no ano de 2013, que afetou o sistema de irrigação do PISG. A ETr obtida pelo MOD16 ficou substancialmente superior aos valores obtidos pelo SEBAL, e muito acima da ETo para os dias investigados.

Palavras-chave: balanço de radiação, fluxo de calor latente, Landsat 5, Landsat 8, albedo

ABSTRACT

The use of water in agriculture is a topic that has been discussed by the scientific community, mainly because it is one of the human activities that consume much more water on our planet. Evapotranspiration is a statement of fundamental climatic significance and plays an important role in the redistribution of energy and mass in our planet. The role of irrigated areas in requesting atmospheric CO₂ by vegetation is very important, especially in studies of climate change. Thus, this study aims to determine the actual evapotranspiration - ETr and water consumption in irrigated areas of the Perímetro Irrigado São Gonçalo – PISG, as well as the gross primary productivity - GPP, using remote sensing techniques. In this sense, we determined the radiation and energy balance through TM - Landsat 5 and OLI/TIRS - Landsat 8 imagery using the SEBAL / METRIC algorithm, and MODIS - Terra data for validation of the results of GPP. We evaluated the impact of topography on radiative balance and three targets were selected for validation of the results. Five images of TM and five of OLI/IRTS collected on the years 2008 and 2013, respectively, were selected. The surface albedo was obtained through the SEBAL and METRIC and the results showed that the METRIC promotes excessive atmospheric correction, leading to underestimation of the albedo. The areas of very steep topography exhibit great variability in instantaneous global solar radiation, directly impacting the net radiation data. It was evident that the net radiation obtained from Landsat 8 was substantially lower than that obtained with Landsat 5, most probably caused by calibration problems in OLI and TIRS sensors, especially in the thermal bands. The average Absolute and Relative Errors, and the Root Mean Square Error associated to the ETr values obtained with the SEBAL compared with ETr according to FAO-56, with Landsat 5 images were well below those obtained with Landsat 8, which may be a consequence of calibration problems and possibly the drought of 2013 year, which affected the irrigation system of the PISG. The ETr obtained by MOD16 was substantially higher than the values obtained by SEBAL, and far above the ETo from the days under investigation.

Key words: radiation balance, latent heat flux, Landsat 5, Landsat 8, albedo, SEBAL.

1. INTRODUÇÃO

A disponibilidade de água em nosso planeta é cerca de 1.400 milhões de quilômetros cúbicos e apenas 2,5% desse volume é de água doce, disponível em geleiras, águas subterrâneas, rios e lagos. Da água doce consumida pela humanidade, cerca de 70% são utilizadas na agricultura irrigada.

No futuro haverá pouca disponibilidade de água para a produção agrícola devido ao acréscimo na demanda dos setores industriais e domésticos, que ao mesmo tempo, com o aumento da população mundial, acarreta numa crescente necessidade pela produção de alimentos (ZWART e BASTIAANSSEN, 2007).

O potencial de irrigação do Brasil é estimado em 29,3 milhões de hectares, incluindo somente áreas em que a irrigação pode ser desenvolvida. As áreas de preservação ambiental, de alto valor ecológico na região Norte, tais como bacias dos rios Amazonas e Tocantins são excluídas da área acima. No Nordeste do Brasil estão localizadas apenas 20% do total das áreas irrigadas, que atualmente compreendem 5 milhões de hectares.

A utilização da água na agricultura é um tema que vem sendo discutido pela comunidade científica mundial, principalmente por aqueles que estão diretamente ligados à prática agrícola, que é uma das atividades humanas que mais consomem água em nosso planeta. No caso do Brasil, essa atividade utiliza 61% de toda água, representando um montante de $591 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (BRASIL, 2006).

A produção mundial de alimentos ocorre majoritariamente no sistema de agricultura de sequeiro. Portanto, muito dependente das condições de tempo e clima de cada região produtora. Um grande desafio consiste em produzir mais alimentos com menor quantidade de água, tarefa que poderá ser bastante dificultada se confirmadas as projeções de mudanças climáticas para as próximas décadas (IPCC, 2013). Some-se às possíveis alterações climáticas

da Terra, o contínuo crescimento da população global, que até o ano de 2050 deve ultrapassar os nove bilhões de habitantes (BOS et al., 2005).

A agricultura irrigada no Nordeste brasileiro tem registrado expansão nos últimos anos, principalmente às margens do rio São Francisco e alguns de seus importantes afluentes, bem como nas proximidades de importantes reservatórios de água doce, como no caso do açude Armando Ribeiro Gonçalves, no Vale do Açu – no Rio Grande do Norte. Novas áreas com potencialidades para a agricultura irrigada vêm se expandindo em outros estados da região Nordeste e um dos exemplos mais recentes se refere a Bacia Hidrográfica dos rios Piranhas-Açu.

Deve ser registrado que na Sub Bacia do Alto Piranhas, no município de Sousa-PB, localiza-se o Perímetro Irrigado de São Gonçalo – PISG com cerca de 5.000 ha, principal região onde se pratica agricultura irrigada na Paraíba, sendo administrado pelo Departamento Nacional de Obras Contra Secas – DNOCS. No entanto, mais recentemente foi identificada uma área de mesma dimensão, com diversos cultivos irrigados inclusive com instalação de pivôs centrais de grande cobertura espacial, o que vem intensificar o uso de água e aumentar ainda mais os conflitos por uso da água naquela bacia hidrográfica. Ressalta-se que a água utilizada nesta área é a do canal da Redenção (Coremas –Várzeas de Souza).

É oportuno registrar que grandes extensões de diversas bacias hidrográficas do semiárido brasileiro nos anos de 2012 e 2013 foram submetidas aos efeitos de secas de grande intensidade. Os irrigantes do PISG estão sofrendo grande restrição quanto à frequência e quantidade de água a ser ofertada às suas culturas agrícolas. Nesse contexto, se verifica que o uso racional de água doce, em especial para irrigação, deve ser assegurado pelos gestores das bacias hidrográficas, razão pela qual a comunidade científica deve se debruçar sobre o tema buscando alternativas eficientes de controle inteligente do uso da água.

Uma importante técnica que auxilia no controle do uso racional da água em bacias hidrográficas e áreas heterogêneas é aquela que possibilita a determinação e mapeamento da evapotranspiração real das culturas – ETr por meio do sensoriamento remoto - SR. Embora a estimativa da ETr possa ser feita com boa acurácia por diversos métodos, a exemplo do balanço de energia baseado na Razão de Bowen, das Correlações Turbulentas, método do Balanço de Água no Solo, o sensoriamento remoto tem como grandes vantagens a cobertura

espacial e o baixo custo (KUSTAS e NORMAN, 1996). Ademais, o SR possibilita a determinação da ETr em escala regional, em que a heterogeneidade das áreas agrícolas contrasta com áreas de vegetação nativa, com grande variabilidade na fração da área coberta com vegetação e condições de umidade do solo.

A determinação da biomassa diária de culturas irrigadas através de técnicas de SR e imagens de satélite tem sido realizada pela combinação de três modelos, quais sejam: a) o modelo de Monteith (1972), utilizado na determinação da radiação fotossinteticamente ativa absorvida – RFAA; b) o modelo de Field et al. (1995), utilizado na determinação da eficiência do uso de luz; e c) o algoritmo METRIC, utilizado na determinação dos componentes do balanço de energia à superfície. Tais técnicas têm proporcionado melhorias no gerenciamento dos recursos hídricos de bacias hidrográficas e propiciado aprimoramento na relação custo-benefício das culturas irrigadas. Para Chasmer et al. (2009) a compreensão da influência da heterogeneidade da cobertura do solo dentro de cada pixel é importante para a extrapolação dos fluxos de CO₂ medidos e modelados do dossel para escalas regionais, usando sensoriamento remoto. Segundo Baldocchi et al. (2001), instrumentos montados em plataformas de satélite têm visão global da Terra e oferecem a possibilidade de avaliar fluxos de carbono à superfície com base em algoritmos que podem ser conduzidos por medições da radiação refletida e emitida.

O presente trabalho objetivou mapear a evapotranspiração real – ETr e a produtividade primária bruta – GPP, e determinar o volume de água consumido nas áreas irrigadas na bacia hidrográfica do Alto Piranhas, em particular, nos Perímetros Irrigados São Gonçalo I – PISGI e São Gonçalo II - PISGII, utilizando técnicas de sensoriamento remoto. Para tanto, foram determinados os balanços de radiação e energia por meio de imagens TM - Landsat 5 obtidas em 2008, e imagens OLI/TIRS - Landsat 8 obtidas em 2013, aplicando as metodologias SEBAL/METRIC. A pesquisa objetivou, ainda: a) avaliar o impacto da inclinação e aspecto de cada pixel da bacia do Alto Piranhas no balanço radiativo; b) desenvolver algoritmo para determinação do albedo com imagens OLI do Landsat 8; c) analisar a contribuição das culturas irrigadas quanto à fixação de carbono no semiárido brasileiro; d) validar os dados de ETr obtidos com o SEBAL/METRIC com o método da FAO-56 em pomares de coqueiros/bananas, arroz e vegetação nativa; e) empreender comparações da ETr e GPP com os produtos MODIS.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 – Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto é uma técnica de aquisição ou medição de informações de alguma propriedade do objeto ou fenômeno, por um dispositivo de registro sem que haja o contato físico com o objeto ou fenômeno. Isso é feito a partir da detecção e registro da energia eletromagnética emitida e/ou refletida pelo alvo. Essas informações podem ser coletadas por sensores instalados a bordo de satélites, o que caracteriza o sensoriamento remoto orbital que, através deste procedimento, gera imagens com base na resposta espectral da região imageada (LILLESAND e KIEFER, 1993).

Em 1957 foi lançado o primeiro satélite artificial produzido pelo homem, chamado de Sputnik I, desenvolvido pela antiga União Soviética. Em 1958 foi a vez dos americanos lançarem o seu primeiro satélite, denominado Explorer I. No entanto, o primeiro satélite a transportar um instrumento meteorológico a bordo foi o Vanguard 2, lançado em fevereiro de 1959. Em 1960 os americanos lançaram o Nimbus I (KIDDER e HAAR, 1995).

O uso de satélites destinados a estudos dos recursos naturais no nosso planeta teve início com o lançamento do Earth 1, em 23 de julho de 1972, batizado mais tarde de Landsat 1, sob a responsabilidade da NASA (National Aeronautic sand Space Administration), dando início a uma nova etapa do sensoriamento remoto orbital. O objetivo principal do programa Landsat foi a aquisição de dados espaciais e temporais da superfície da terra, de forma global, contínua e repetitiva (FEITOSA, 2005). O programa Landsat é composto de uma série de oito satélites, lançados em intervalos de 3 a 4 anos, sendo que o Landsat 6 fracassou durante o lançamento e o Landsat 7 foi desativado em 2003. Na Tabela 2.1 é apresentado um resumo da história do programa Landsat.

Tabela 2.1 – Resumo do Programa Landsat

Satélite	Data de Lançamento	Altitude	Inclinação	Sensor a Bordo	Cobertura	Término da Operação
Landsat 1	23 /07/ 1972	900 Km	99,2°	RBV e MSS	18 dias	06/01/ 1978
Landsat 2	22/01/1975	900 Km	99,2°	MSS e RBV	18 dias	05/02/1982
Landsat 3	05/03/ 1978	900 Km	99,2°	MSS e RBV	18 dias	31/03/1983
Landsat 4	16/07/1982	705 Km	98,2°	TM e MSS	16 dias	15/06/2001
Landsat 5	01/03/1984	705 Km	98,2°	TM e MSS	16 dias	05/06/2013
Landsat 6	05/10/ 1993	-	-	ETM	-	Fracassou
Landsat 7	15 /04/1999	705 Km	98,2°	ETM ⁺	16 dias	31/05/03
Landsat 8	11/02/2013	705 Km	98,2°	OLI,TIRS	16 dias	Ativo

Fonte: NASA (2013)

A órbita do Landsat 5 é quase polar, heliossíncrona e ocorre a uma altitude de 705 km, cruzando o Equador de norte para sul, o que significa dizer que o mesmo opera numa órbita descendente, sempre imageando cada região aproximadamente às 9h30min (hora local). O mesmo tem um tempo de percurso de órbita de 98,2 minutos, realizando 14 órbitas por dia, com tempo de revisita de 16 dias (GARCIA, 1982). O sensor TM (*Thematic Mapper*) foi colocado em órbita em 1982, fazendo parte da carga útil dos satélites Landsat 4 e 5, conforme pode ser observado na Tabela 2.1. O TM opera em sete bandas espectrais, sendo três na região do visível, três na região do infravermelho (IV) refletido e uma na região do IV termal. A largura da faixa imageada é de 185 km, com resolução espacial nas regiões do visível e infravermelho próximo de 30 m x 30 m e na região do termal de 120 m x 120 m.

No dia 11 de fevereiro de 2013 a NASA lançou o satélite LDCM (Landsat Data Continuity Mission), chamado de Landsat 8, em Vandenberg Air Force Base, na Califórnia. A USGS é responsável pelas operações desta missão, que inclui a coleta, arquivamento, processamento e distribuição de produtos dados. A órbita do Landsat 8 é heliossíncrona, semelhante a dos seus antecessores Landsat 5 e 7 (NASA, 2013). O Landsat 8 possui dois sensores: OLI – Operational Land Imager e o TIRS – Thermal Infrared Sensor, com nove e duas bandas espectrais, respectivamente. A resolução espacial do OLI é de 30 m x 30 m, exceto a banda pancromática, com resolução de 15 m x 15 m. Já o TIRS possui duas bandas termais com resolução de 100 m x 100 m, mas que é distribuída com 30 m x 30 m. Ambos os sensores possuem resolução radiométrica de 12 bits, mas os seus dados são distribuídos em 16 bits. Essa alta resolução radiométrica assegurar um maior grau de detalhamento das

informações coletas pelos sensores OLI e TIRS (NASA, 2013). Outra vantagem das imagens OLI e TIRS é que as mesmas são disponibilizadas com registro, o que dispensa uma tarefa importante.

2.1.1 – MODIS-Terra

O satélite Terra, lançado em 18 de dezembro de 1999 como parte do programa Earth Observing System (EOS), financiado pelo programa ESE (Earth Science Enterprises) da NASA, leva a bordo cinco sensores: MODIS (Moderate resolution Imaging Spectro radiometer), ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System Network), MISR (Multi-angle Imaging Spectro radiometer) e MOPITT (Measurements of Pollution in the Troposphere).

O sensor MODIS, projetado para adquirir dados relativos à interação terra, oceano e atmosfera, possui 36 bandas com cobertura espectral de 0,4 – 14,4 μm e espacial de 250 m (bandas 1 e 2), 500 m (bandas 3 a 7) e 1000 m (bandas 8 a 36), oferecendo cobertura global com tempo de revisita de 1 a 2 dias. Uma imagem representa no solo uma área de largura igual a 2330 Km. Suas características orbitais são: órbita polar heliossíncrona com altitude de 705 km, velocidade de 6,7 km/s, cruzamento equatorial por volta das 10h30min (tempo local). Esse sensor mede a percentagem da superfície do planeta que está coberta por nuvens quase todos os dias. Esta ampla cobertura espacial permite ao MODIS, em conjunto com MISR e CERES, determinar o impacto das nuvens e dos aerossóis sobre o balanço energético da Terra. Quase todos os dias por todo o globo terrestre, o sensor monitora mudanças na superfície terrestre, construindo assim uma base e alargamento do patrimônio iniciada pelo Landsat (fonte: <http://modis.gsfc.nasa.gov/>).

As 36 bandas espectrais do sensor MODIS estão localizadas nos comprimentos de onda, cuidadosamente escolhidos para a observação de feições das propriedades das nuvens, dinâmica e propriedades da vegetação na cobertura terrestre, e da temperatura da superfície continental e dos oceanos em todo o globo (SALOMONSON e TOLL, 1990). As primeiras 19 bandas estão posicionadas na região do espectro eletromagnético situado entre 405 nm e 2155 nm, de forma que as bandas 1 a 7 estão direcionadas para as aplicações terrestres; as bandas 8 a 16 para as observações oceânicas e as bandas 17 a 19 para as medições atmosféricas. As bandas 20 a 36, com exceção da banda 26 (1360-1390 nm), cobrem a porção termal do espectro.

Uma importante característica desse sensor é o fato de seus dados serem disponibilizados georreferenciados e corrigidos para efeitos atmosféricos. Atualmente, existem 44 produtos de dados que estão compreendidos em calibração, atmosfera, terra, criosfera e oceano. O conjunto de dados de geolocalização MODIS, chamado MOD03, é composto de latitude, longitude e altitude do solo, ângulo zenital do Sol, ângulo zenital do satélite e ângulo azimutal para cada pixel com 1 km de resolução (BISHT et al., 2005). Mais informações sobre os produtos MODIS podem ser encontradas em Justice et al. (2002), Anderson et al. (2003) e Bisht et al. (2005).

2.2 – Métodos de determinação da evapotranspiração

O termo evapotranspiração foi proposto por Thornthwaite (1944) para representar ambos os processos da evaporação e transpiração, que ocorrem de maneira natural e simultânea, em uma superfície vegetada. Pereira et al. (1997) definem a evapotranspiração (ET) como a quantidade de água evapotranspirada que depende do suprimento de água das plantas, do poder evaporante do ar e da disponibilidade de energia, sendo que este último fator predomina sobre os demais, de modo que a quantidade de água consumida por uma cultura, varia com a extensão da área coberta vegetal e demanda atmosférica.

Allen et al. (1998) definem evapotranspiração de referência (ET_o) como a taxa de ET de uma superfície de referência – cultura de referência hipotética (grama) – sem escassez de água, e deste modo fatores do solo não a afetam. Este conceito foi introduzido para estudar a demanda evaporativa da atmosfera independentemente do tipo de cultura, do desenvolvimento da mesma e das práticas de gestão. Ainda segundo os referidos autores, os valores de ET_o medidos ou computados em diferentes locais ou estações do ano são comparáveis, visto que referem-se a ET da mesma superfície de referência. Ela é influenciada pelo tipo de cultura, manejo de solo, gestão das condições ambientais e, principalmente, por parâmetros que dizem respeito ao tempo. Os elementos do tempo que têm maior importância neste processo são: radiação solar, temperatura da superfície do solo e do ar, umidade relativa do ar e a velocidade do vento (PEREIRA et al., 2002).

O conhecimento da evapotranspiração real é essencial ao processo de gerenciamento dos recursos hídricos, seja em escala local ou regional. Neste sentido, a determinação da ET_r em escala local pode ser feita com boa precisão quando considerado o sistema solo-planta-atmosfera. Para tanto, a existência de uma rede de estações meteorológicas automáticas que propicie o cômputo da ET_o com qualidade e boa cobertura espacial é de fundamental importância. Neste caso, a determinação da ET_r depende da existência do coeficiente de

cultura K_c e pode ser calculada pelo simples produto da E_{To} pelo K_c . Este é um método simples e eficaz, mas tem sua precisão dependente da qualidade do K_c , que é afetado pelo tipo de irrigação, espaçamento da cultura e estágio fenológico, dentre outros fatores.

Quando há necessidade do conhecimento das necessidades hídricas de uma cultura específica em escala local, recorre-se aos consagrados métodos do *Balanço de Energia baseado na Razão de Bowen* – BERB (AZEVEDO et al., 2003), das *Correlações Turbulentas* – BECT (BALDOCHI et al., 2000), do *Balanço Hídrico* de um volume específico de solo (AZEVEDO et al., 2006), da lisimetria, dentre outros. No entanto, quando há necessidade do conhecimento da E_{Tr} em escala regional, esses métodos não oferecem o devido suporte, vez que os mesmos são aplicados a condições muito específicas e têm, portanto, validade apenas para tais condições. Assim, técnicas de sensoriamento alimentadas por imagens de satélites desenvolvidas recentemente oferecem a possibilidade de determinação de mapas de albedo (SILVA et al., 2005a; SANTOS et al., 2008), do saldo de radiação (BISHT et al., 2005; SILVA et al., 2005b), da temperatura de superfície (SOUZA e SILVA, 2005; BLACKETT, 2014) e do balanço de energia (TREZZA, 2002; TASUMI, 2003; ALLEN et al., 2007; TEIXEIRA et al., 2009; SILVA et al., 2009; BORGES, 2009; SILVA et al., 2012).

2.2.1 – Balanço de energia baseado via Razão de Bowen

O método do *Balanço de Energia baseado na Razão de Bowen* – BERB é possivelmente um dos mais difundidos e aplicados para o de cômputo da E_{Tr} de culturas. O BERB propicia o conhecimento da E_{Tc} por meio de medidas dos gradientes verticais de temperatura e pressão parcial do vapor d'água atmosférico, além de medidas do saldo de radiação e fluxo de calor no solo. Para Todd et al. (2000), o BERB é um método de determinação indireta da E_{Tc} , ao contrário da lisimetria de pesagem e correlações turbulentas. Esse método tem sido empregado em vários países e por diversos pesquisadores no Brasil, por reunir simplicidade e praticidade, além de custo bem mais reduzido do que o das correlações turbulentas, por exemplo, considerado o de concepção mais refinada e precisa. Os críticos do BERB apontam como principal limitação ao uso desta técnica a igualdade dos coeficientes de difusão turbulenta de calor sensível – K_h e de calor latente – K_v , o que somente ocorreria em condições de neutralidade atmosférica. Não obstante esta simplificação, inúmeros trabalhos científicos confirmam a precisão da técnica em comparação, inclusive, com medições lisimétricas.

Estudos desenvolvidos por SILVA et al. (2005) empregando o BERB combinado com outras técnicas, que utilizaram os métodos da razão de Bowen e lisímetro de pesagem em área cultivada com capim Tanzânia em Piracicaba – SP entre julho de 2000 e julho de 2001, obtiveram valores médios diários da ETc de 4,13 mm dia⁻¹ utilizando a razão de Bowen e 4,34 mm dia⁻¹ com lisímetro de pesagem, encontrando um erro relativo de 4,8%. Por sua vez, Silva et al. (2007) observaram que cerca de 70% do saldo de radiação foi repartido como fluxo de calor latente e cerca de 8% como fluxo de calor no solo, em dois ciclos produtivos com a mangueira irrigada em bebedouro, no submédio São Francisco. Já Teixeira et al. (2008) efetuaram o balanço hídrico juntamente com o BERB e o BECT, ao avaliar a produtividade de água em pomar de mangueiras irrigado no submédio São Francisco. Verificaram uma ETr acumulada média de 1.419 mm ano⁻¹ e ETr média diária de 3,7 mm. Os valores médios do coeficiente de cultivo baseado na ETr – K_C e baseado na transpiração – K_{cb} foram 0,91 e 0,73, respectivamente, com fração evaporativa média de 0,83 e produção média de 45 toneladas ha⁻¹, sendo equivalente a uma produtividade de água de 3,2 kg m⁻³.

2.2.2 – Balanço de energia via correlações turbulentas

O método das Correlações Turbulentas – BECT é considerado o mais consistente dentre os diferentes métodos de balanço de energia. No entanto, oferece algumas dificuldades para seu emprego, uma vez que os instrumentos de medição dos dados requeridos necessitam ter grande precisão e tempo de resposta rápido. Embora haja diversos registros de sua aplicação em cultivos agrícolas, é o mais empregado em estudos ambientais, particularmente em florestas. O BECT baseia-se no fato de que os fluxos de calor sensível – H e calor latente – LE são amplamente transferidos via difusão turbulenta. Por este motivo, os fluxos podem ser diretamente medidos pela correlação das flutuações da componente vertical da velocidade do vento – w' com as flutuações da temperatura e umidade específica, admitindo que na velocidade vertical média do vento a superfície é nula.

Apesar das dificuldades na obtenção dos dados utilizado neste método, o mesmo tem sido empregado em várias pesquisas realizadas com cultivos irrigados e vegetação nativa, com o propósito de determinação dos fluxos de calor sensível e latente. Nesta direção podem-se citar os trabalhos de Lang et al. (1983), que usaram o BECT em cultivo de arroz na Austrália, Teichrieb et al. (2007) o empregaram ao efetivar balanço de energia no Rio Grande do Sul e Teixeira et al. (2008) utilizaram o referido método em pomar de mangueiras irrigado em Petrolina – PE.

2.3 - Balanço de energia via sensoriamento remoto

2.3.1 – Algoritmo SEBAL

O método de balanço de energia através do sensoriamento remoto necessita da utilização de algoritmos apropriados, gerados a partir de imagens de satélites. Dentre eles destacam-se o Surface Energy Balance Algorithm for Land - SEBAL (BASTIAANSEN, 1995), o SEBS (JIA et al., 2003), o S-SEBI (ROERINK, 2000; SANTOS e SILVA, 2010) e o SEBTA (CONRAD et al., 2007). Estes métodos possibilitam a determinação das componentes do balanço de energia e, portanto, o fluxo de calor latente (LE) e a evapotranspiração. O SEBAL tem a vantagem de requerer poucos dados de superfície e imagens de satélite em regiões do visível, infravermelho próximo e infravermelho termal, este último usado na determinação da temperatura da superfície.

O SEBAL vem sendo amplamente aplicado em áreas agrícolas, com objetivo de determinar o consumo hídrico das culturas, bem como em diversas finalidades, tais como avaliação do uso da água, biomassa e produtividade das culturas, análise de impactos ambientais, entre outros. Bastiaanssen e Ali (2003) utilizaram a fração evaporativa gerada pelo SEBAL para determinar a biomassa de culturas; Ahmad et al. (2009) analisaram a adequabilidade de sistemas de irrigação também com a fração evaporativa; Silva et al. (2011), LI et al. (2008), Immerzel et al. (2008), Karatas et al. (2009) entre outros aplicaram produtos do SEBAL na avaliação do uso de água pelas culturas.

Novas técnicas surgiram como alternativas de aperfeiçoamento do SEBAL. Tasumi (2003) sugeriu utilizar o aspecto/inclinação da superfície e correção atmosférica das reflectâncias das bandas espectrais no cômputo do albedo e Trezza (2002) trouxe mudanças na extrapolação da ET instantânea para valores diários. A partir de tais mudanças, desenvolveu-se o METRIC - Mapping Evapotranspiration at high Resolution with Internalized Calibration (ALLEN et al., 2007).

O SEBAL e o METRIC já foram aplicados e validados em várias regiões do mundo (ALLEN et al., 2005; BASTIAANSEN et al., 2005; SILVA e BEZERRA, 2006; BORGES 2011; BEZERRA et al., 2008), sendo também utilizados para avaliar a precisão de outros métodos de estimativa da ET (ZWART et al., 2010; SENAY et al., 2011). Utilizando diversos métodos para validação, Bastiaanssen et al. (1998a) concluíram que o SEBAL apresenta 95% de precisão quando comparado à medidas diretas de fluxos energéticos ou balanço hídrico.

Na estimativa do consumo hídrico de culturas, o SEBAL oferece ainda três vantagens distintas quando comparado a outros métodos: a) não é necessário saber o tipo de cultura para resolver o balanço de energia; b) a ocupação da área, quer seja por água, por cultivos agrícolas ou vegetação nativa, é observada diretamente na imagem do satélite de maneira precisa, superando a dificuldade típica de buscar registros do uso do solo nas áreas irrigadas (tipo de cultura, fase fenológica, configuração de plantio, dentre outros fatores) especialmente para análises históricas; c) o mesmo computa a evapotranspiração real (ET), inerente aos efeitos de salinidade, irrigação deficitária, pragas e doenças da cultura etc. Essas influências são quase impossíveis de ser consideradas ao se empregar o produto do Kc pela ETo, que requer condições especiais da cultura, de modo que essa relação represente adequadamente suas exigências hídricas.

2.3.2 – Algoritmo METRIC

Nos últimos anos, no entanto, tem sido registrado um grande número de estudos com o SEBAL e, mais recentemente, com uma variante do mesmo, denominada METRIC (ALLEN et al., 2007), que se aplicada a terrenos montanhosos. No METRIC o cômputo do albedo superficial, diferentemente do apresentado nas versões anteriores do SEBAL, é obtido a partir da refletância corrigida aos efeitos atmosféricos banda a banda. Este método estima o albedo superficial pelo cômputo da refletância da superfície para cada banda do sensor, através da utilização de código de transferência radiativa e equações de regressão que visam simplificar a estimativa da transmissividade em cada banda refletiva do TM – Landsat 5, oferecendo mais operacionalidade ao processo (TASUMI, 2003).

Também é introduzida na metodologia METRIC parametrização atualizada da determinação de G, que de acordo com Tasumi (2003) melhor estima tal fluxo para solo exposto. Esta parametrização é composta de duas equações em que G é determinado em função da temperatura da superfície, do Índice de Área Foliar – IAF e Rn, em que uma das equações é utilizada na determinação de G em solo exposto ($IAF < 0,5$) e a outra em solo vegetado ($IAF \geq 0,5$).

O fluxo de calor latente (H) representa o cerne da metodologia SEBAL, sendo computado em função da velocidade do vento registrada em algum ponto da área de investigação, da estimativa da resistência aerodinâmica ao transporte de calor e da diferença de temperatura estimada entre a superfície e o ar próximo a mesma (TASUMI, 2003), na qual a maior presunção está na obtenção do gradiente de temperatura próxima à superfície, ΔT ,

sendo obtida como função linear entre ΔT e T_s – temperatura da superfície, eliminando a necessidade da calibração da temperatura absoluta da superfície, que é o maior obstáculo na operacionalidade da obtenção da E_{Tr} através do SR (BASTIAANSSEN et al., 2005).

Para a obtenção da função ΔT são selecionados dois pixels de condições extremas de temperatura e umidade dentro da área de estudo, denominados de pixels âncoras, pixels “quente” e “frio”. A principal diferença entre o SEBAL e o METRIC reside nos critérios para escolha desse pixels. Na metodologia tradicional do SEBAL (BASTIAANSSEN et al., 1998b) o pixel frio é selecionado num corpo d’água, cujo H é nulo e LE é máximo, enquanto que o pixel quente é geralmente selecionado numa área de deserto, cujo LE é nulo e o H é máximo. No METRIC o pixel quente é definido numa área de solo exposto $LE = 0$. Já o pixel frio deve ser selecionado em uma área agrícola com cultivo em pleno desenvolvimento, com características similares a cultura de referência (alfafa). Para o pixel frio não se considera $LE = R_n - G$ e sim $LE = 1,05 \times E_{Tr}$, onde E_{Tr} é a evapotranspiração de referência estimada pelo método de Penman Monteith (ALLEN et al., 2007; GIONGO, 2011).

Outra importante diferença é a extrapolação da E_{Tr} instantânea para a E_{Tr} diária – E_{Td} , que é efetuada em função da Fração de Evapotranspiração de Referência – FET_0 , que é obtida pela razão entre a E_{Tr} instantânea e a ET_0 horária baseado no manual da FAO, ao invés da Fração Evaporativa – FE , obtida pela razão entre LE instantâneo e a energia disponível instantânea ($R_n - G$) utilizada no SEBAL tradicional, contabilizando melhor os efeitos da variação da velocidade do vento e da advecção. No SEBAL considera-se que a FE é considerada constante ao longo do dia, logo se num dado dia essa condição não for verificado, pela presença de nuvens de maior espessura, por exemplo, a sua precisão é comprometido. Já no METRIC assume-se que a FET_0 horária é igual à FET_0 diária, o que se mostra mais consistente, uma vez que as alterações nas condições de tempo (mudanças na temperatura do ar, umidade, vento, radiação solar etc) estão contempladas na ET_0 diária. No entanto, a sua utilização requer a disponibilidade de dados horários de estação meteorológica automática, o que pode se apresentar como uma séria restrição em algumas regiões. Segundo Allen et al. (1998), a ET_0 representa uma espécie de “ET potencial”, sendo definida como a ET de um campo de alfafa bem irrigado com altura de 50 cm, com resistência superficial – r_s , diária de 45 s m^{-1} , r_s horária diurna de 30 s m^{-1} e r_s noturna de 200 s m^{-1} , apresentando albedo de 0,23 (ALLEN et al., 1998). Sendo assim, a FET_0 é utilizada na extrapolação da E_{Tr} pelo produto da mesma com a ET_0 diária. De acordo com Tasumi (2003) a maior vantagem do uso

da FE no SEBAL tradicional está relacionada à dispensa do uso de dados meteorológicos horários no cômputo da ET_0 .

2.4 - Bacia hidrográfica do Piranhas-Açu

A bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açu situa-se na área semiárida do Nordeste brasileiro, e está inserida em território dos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte. É composta por sete sub-bacias: Piancó, Peixe, Alto Piranhas, Médio-Piranhas, Espinharas, Seridó e Baixo Piranhas. No Rio Grande do Norte ainda tem as subbacias: Paraí, Pataxó, cabugi e Bodó. O principal rio da bacia é o rio Piranhas-Açu, com 405 quilômetros de extensão, nasce no município de Bonito de Santa Fé – PB, com o nome de rio Piranhas, e segue seu curso natural. Adentra o estado do Rio Grande do Norte ainda nomeado de rio Piranhas pelo Município de Jardim de Piranhas, e recebe o nome de Piranhas-Açu ao passar pela Barragem Armando Ribeiro Gonçalves, no município de Açu – RN. Deságua no Oceano Atlântico, através de sua foz no município de Macau – RN.

Como a maioria dos rios do semiárido nordestino, o Piranhas-Açu é um rio intermitente em condições naturais. A perenidade de seu fluxo é assegurada por dois reservatórios de regularização construídos pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas – DNOCS: o complexo Coremas – Mãe d'Água, no estado da Paraíba, com capacidade de 1,36 bilhão de m^3 , e a barragem Armando Ribeiro Gonçalves, no Rio Grande do Norte, com 2,4 bilhões de m^3 (CBHPA, 2011).

A bacia hidrográfica do Piranhas-Açu possui uma área total de drenagem de 43.681,5 Km^2 , sendo 26.183,0 Km^2 , correspondendo a 60% da área no estado da Paraíba, e 17.498,5 Km^2 , correspondendo a 40% da área no estado do Rio Grande do Norte. Contempla 147 municípios, sendo 102 municípios na Paraíba e 45 municípios no Rio Grande do Norte e conta com uma população total de 1.363,802 habitantes, sendo 914.343 habitantes (67%) na Paraíba e 449.459 habitantes (33%) no Rio Grande do Norte (AESAs, 2011).

A área da bacia apresenta precipitações médias anuais alternando entre 400 e 900 mm concentradas nos meses de fevereiro a maio. A concentração das chuvas em poucos meses do ano, combinada a geomorfologia da região, caracterizada por solos rasos formados sobre um substrato cristalino, com baixa capacidade de armazenamento, é responsável pelo caráter intermitente dos rios da região. Além disso, o padrão de precipitação tende a apresentar uma forte variabilidade interanual, ocasionando a alternância entre anos de chuvas regulares e anos de acentuada escassez de água, levando a ocorrência de períodos de secas. As taxas de

evapotranspiração também são bastante elevadas, ocasionando um déficit hídrico significativo nos reservatórios da região (CBHPA, 2011). Na agricultura irrigada os solos mais explorados são os solos aluviais, dispersos em toda bacia, e os vertissolos presentes na bacia do rio do Peixe na Paraíba.

Em relação à atividade industrial existente na Bacia, esta compreende a indústria têxtil em São Bento, curtumes, sal, cerâmica e laticínios e a indústria de petróleo e gás nas proximidades do Alto do Rodrigues e Macau (CBHPA, 2011).

2.4.1 - Perímetro Irrigado São Gonçalo

O município de Sousa é cortado pelos rios Piranhas e do Peixe, sendo detentor de um grande potencial para aproveitamento dos seus recursos hídricos, visando o aperfeiçoamento da atividade agrícola. Entretanto, até a década de 1930, a preocupação em torno dos recursos hídricos ali existentes esteve voltada prioritariamente para os abastecimentos humano e animal, visto ser a climatologia local favorável à ocorrência de períodos de longa estiagem na região. A partir de 1936, com a inauguração do Açude Público e do Posto Agrícola de São Gonçalo, foi iniciada a exploração agrícola irrigada, sob a coordenação da Comissão Técnica de Reflorestamento e Postos Agrícolas, da Inspeção Federal de Obras Contra as Secas – IFOCS, posteriormente transformada em Departamento Nacional de Obras Contra as Secas – DNOCS. A nova etapa de exploração agrícola com a irrigação não desencadeou grandes mudanças econômicas, mas abriu perspectivas importantes para o desenvolvimento de ações visando ao aperfeiçoamento da atividade produtiva na região. Assim, em 1940, foi criado o Instituto da Região Seca, localizado no posto agrícola que, de acordo com Carneiro (1998), foi o primeiro organismo de pesquisa da região, destacando-se por levantamentos pedológicos e produção de trabalhos de melhoramento genético, recuperação de solos afetados por sais e diversos estudos e atividades.

Na década de 1970, o DNOCS deu início a um processo de reorientação de suas atividades, previsto no I Plano Nacional de Desenvolvimento, passando a concentrar grande parte de seus esforços na expansão da agricultura irrigada, até então limitada a pequenas porções de terra situadas nas bacias hidrográficas de grandes açudes públicos. A nova concepção programática passou a considerar o fortalecimento da economia regional, enfocando não apenas o combate preventivo aos efeitos das variabilidades climáticas, mas também a necessidade de modernizar e expandir as atividades agropecuárias do semiárido nordestino. Nesse contexto foi criado, em 1973, o Perímetro Irrigado de São Gonçalo - PISG,

abrangendo uma superfície de 4.335 ha que tinha como meta, utilizando-se da irrigação por gravidade, assentar 515 famílias numa superfície agrícola útil de 3.350 ha. Em 1976, o Perímetro operava com uma superfície agrícola útil de 1.144 ha e já havia assentado 20 famílias (DNOCS, 1978). Neste estudo, denomina-se Perímetro Irrigado São Gonçalo I – PISG I, ao PISG criado em 1973, e perímetro irrigado São Gonçalo II – PISG II, implantado nos últimos 6 anos como uma extensão do PISG, que aumentou ainda mais a pressão pelo uso da água na região.

Nos primeiros anos de operação as produções agrícolas do Perímetro Irrigado de São Gonçalo foram altamente expressivas para a economia da região local. Porém, devido a diversos fatores intervenientes na produção, já são observados sinais de degradação dos solos e até mesmo a ocorrência de áreas improdutivas (Chaves et al., 1995). Conforme DNOCS (1991), a área afetada por salinidade nos perímetros irrigados do Nordeste brasileiro estava em torno de 7,8 % da superfície agrícola útil, o que correspondia a cerca de 2000 ha. Especificamente em relação ao Perímetro Irrigado São Gonçalo, 24% da sua área estão afetados por sais. Na Figura 2, identifica-se com mais precisão quais culturas são existentes no PISG.

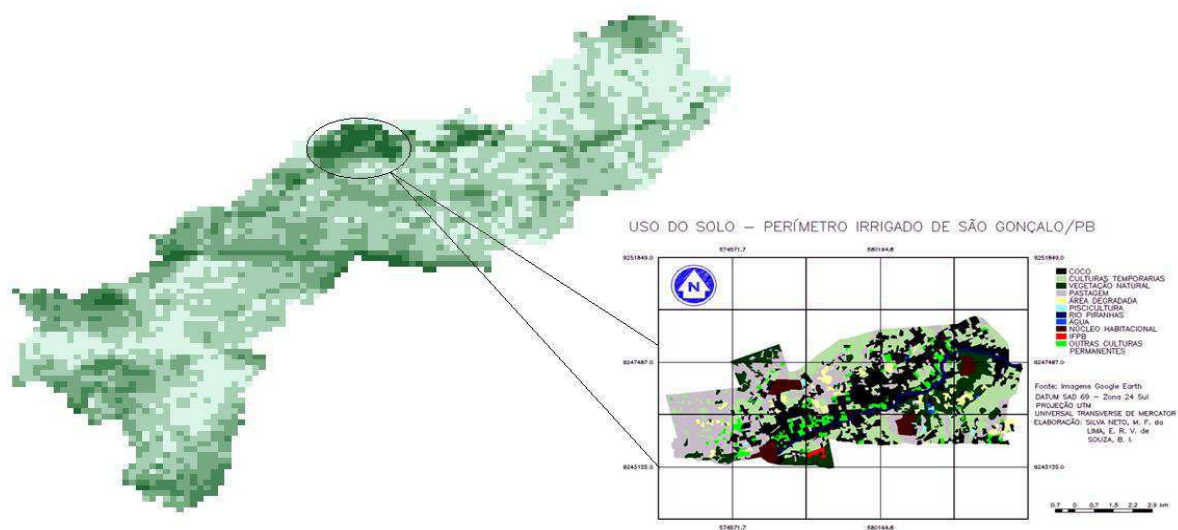


Figura 2. 1 – Bacia do Alto Piranhas com destaque para o mapa de uso do solo do PISG I ano 2008.

2.5 – Produtividade primária bruta- GPP

O balanço líquido de carbono de um determinado ecossistema é resultado do fluxo de carbono tanto na forma orgânica, quanto pela inorgânica, independente da forma temporal e espacial (CHAPIN et al., 2006). O fluxo destes gases entre o ecossistema e a atmosfera é

conhecido como Net Ecosystem Exchange (NEE) e neste caso considera-se todo e qualquer tipo de gases compostos por carbono, até mesmo partículas de carbono presentes em queimadas, deposição vinda da água e intervenção antropogênica (OLIVEIRA, 2010).

No balanço global de carbono, os fluxos de CO₂ atmosférico à superfície sobre ecossistemas vêm se tornando um objeto de relevante interesse científico, pois o entendimento desses processos está vinculado ao papel da biosfera no controle de evapotranspiração e da emissão/fixação de CO₂, dessa forma relacionados fortemente à questão de variabilidade climática regional e global (FREITAS e ROCHA, 2000). Os processos de trocas de energia, vapor de água e dióxido de carbono (doravante referido como CO₂) entre a superfície da Terra e a atmosfera são fatores que afetam diretamente a temperatura do ar próximo à superfície, a concentração de CO₂ da camada limite, o desenvolvimento e a estrutura da camada limite, além do desenvolvimento das nuvens e da precipitação (FISCHER et al., 2007).

Existem diversos métodos destinados à quantificação do carbono estocado na vegetação (GALLON et al., 2006; LEFSKY et al., 2005; SANTOS e COSTA, 2003), dentre os quais se destaca a técnica da covariância de vórtices turbulentos, muito empregada para quantificar o fluxo de CO₂ em diversos ecossistemas florestais (FALGE et al., 2002; BALDOCCHI, 2003; AGUIAR et al., 2006; OLIVEIRA et al., 2006; KIRSCHBAUM et al., 2007; BEER et al., 2010; CABRAL et al., 2011; SILVA et al., 2013). Esta técnica goza de grande prestígio junto à comunidade científica, mas seu custo e operacionalidade muitas vezes se apresentam proibitivos para vários grupos de pesquisa nos países em desenvolvimento. Outra questão que restringe o uso de tal técnica é a sua representatividade, que cobre apenas alguns quilômetros quadrados, salvo nos casos de áreas extensas e homogêneas. Nesse sentido, os métodos que empregam o sensoriamento remoto (WU et al., 2009; ZHAO et al., 2005; XIAO et al., 2004; SIMS et al., 2008; GITELSON et al., 2008; HILKER et al., 2008; LI et al., 2007; TURNER et al., 2006; KALFAS et al., 2011) apresentam como grande vantagem a ampla cobertura espacial, baixo custo e maior operacionalidade. Muitas dessas técnicas se fundamentam no conceito de eficiência de uso da luz – LUE (do inglês *Light Use Efficiency*) proposto por Monteith (1972). A sua aplicação prática resultou de grande contribuição dada por Field et al. (1995) e, mais recentemente, Bastiaanssen & Ali (2003) apresentaram contribuição significativa ao empregar o conceito de fração evaporativa com vistas a contabilizar o fator água no processo de fixação do carbono por parte da vegetação.

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - Materiais empregados

3.1.1 - Área geográfica de estudo

A área de estudo compreende parte da bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açu, que se situa na zona semiárida do Nordeste brasileiro e está inserida em território dos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte. A mesma é composta por sete sub-bacias: Piancó, Peixe, Alto Piranhas, Médio-Piranhas, Espinharas, Seridó e Baixo Piranhas. Na sub-bacia do Alto Piranhas localiza-se o principal perímetro irrigado do estado da Paraíba, denominado Perímetro Irrigado de São Gonçalo - PISG e, mais recentemente, de sua expansão, aqui denominada de Perímetro Irrigado de São Gonçalo II – PISG II. Esse perímetro localiza-se a 15 km do município de Sousa - PB (6,84°S; 38,32°W; 234 m) e fica a aproximadamente 440 km da capital João Pessoa. A área de estudo compreende, além do Perímetro Irrigado de São Gonçalo (PISG I e II), o açude de São Gonçalo, áreas de vegetação nativa, agricultura de sequeiro e áreas de topografia muito acidentadas, destinadas a se avaliar o impacto da inclinação e aspecto no saldo de radiação (Figura 3.1). O recorte da área compreende cerca de 230.000 ha, sendo que o PISG I e PISG II representam respectivamente 5.000 e 7.500 ha. O açude de São Gonçalo possui capacidade hídrica de 44,6 milhões de metros cúbicos, tendo como objetivo amenizar os efeitos das estiagens sofridos pela população local.

3.1.2 – Caracterização edafoclimática da área

O clima da região de estudo é classificado como semiárido, tipologia DdA', segundo metodologia de Thornthwaite e Matther (1944), com estação chuvosa concentrada no período janeiro - maio (Tabela 3.1). As médias anuais da temperatura do ar, precipitação pluvial e evapotranspiração potencial – ETp são respectivamente iguais a 26,6°C, 904,1 mm e 1418

mm. No entanto, as temperaturas mínima e máxima oscilam entre 19,4 a 22,3 °C, e 31,5 e 35,6 °C, respectivamente (Tabela 3.1). Os solos predominantes na área são Latossolos e Cambissolos e a vegetação natural é classificada como Contato Caatinga-Floresta Estacional e Formações Pioneiras com Influência Fluviomarinha (SEI, 2008). Análises em laboratório dos atributos físicos, químicos e mineralógicos realizados por Corrêa et al. (2003) demonstraram que os Neossolos Flúvicos no rio do Peixe apresentam uma textura mais argilosa com características vérticas, enquanto na bacia do rio Piranhas apresentam predominância de textura arenosa tornando uma vantagem positiva pois aumenta o poder de retenção de umidade.

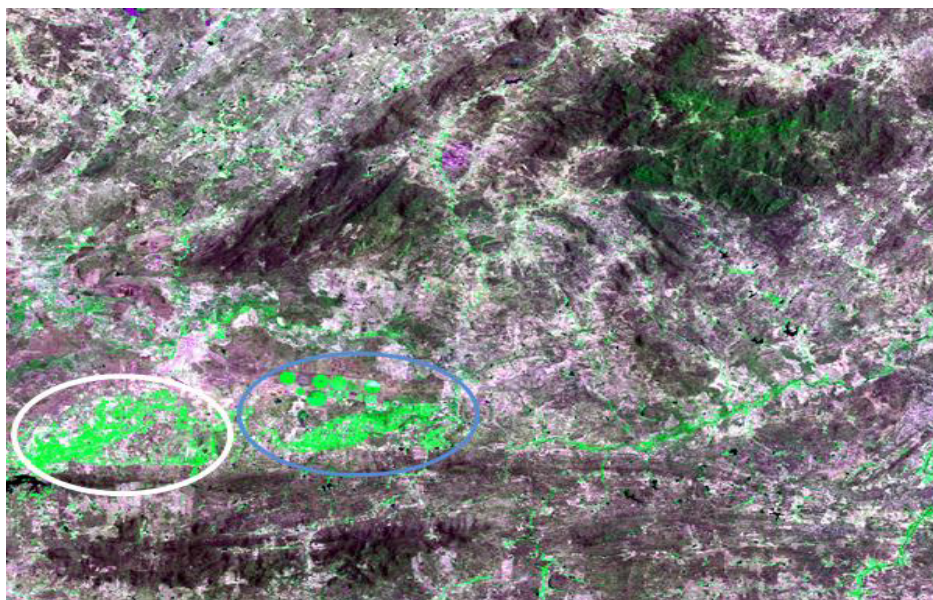


Figura 3.1 – Recorte de imagem OLI do Landsat 8 do dia 12 de setembro de 2013 em composição RGB453 com destaque para o PISG I (cor branco) e II (cor azul)

Tabela 3.1 – Precipitação média – PM (mm) e desvio padrão – DP (mm), temperatura do ar média mensal – Ta (°C), temperaturas máxima e mínima Ta (°C) segundo registros da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas da UFCG

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
PM	96,0	176,1	247,2	175,7	68,8	34,6	15,8	5,6	4,6	11,7	18,6	41,2
DP	69,4	106,3	107,9	112,7	62,4	44,4	20,0	9,5	12,4	17,9	32,1	47,9
Ta	27,5	26,5	26,2	26,0	25,8	25,3	25,3	26,3	27,2	27,8	27,8	27,9

3.1.3 - Imagens de satélite utilizadas

Para o estudo foram empregadas imagens do Landsat 5 e também do Landsat 8, além de produtos obtidos com base em imagens MODIS do satélite Terra. Inicialmente, todas as bandas do TM e do OLI/TIRS foram empilhadas, recortadas e registradas (apenas as TM) antes de se obter os diferentes componentes dos balanços de radiação e energia.

3.1.3.1 – Imagens TM - Landsat 5

Foram selecionadas cinco imagens geradas pelo *Mapeador Temático* – TM do satélite Landsat 5, órbita 216 e ponto 65, adquiridas junto ao site do Instituto de Pesquisas Espaciais – INPE. Cada imagem é composta de sete bandas espectrais cujas principais características estão representadas na Tabela 3.2. Essas imagens correspondem à passagem do Landsat 5 às 09h30min (tempo local) no ano de 2008 nos dias: 29 de agosto (DAS 241), dia 14 de setembro (DAS 257), dia 1 de novembro (DAS 305), 17 de novembro (DAS 321) e 19 de dezembro (DAS 353). O sensor TM mede a radiância espectral dos alvos e armazena-os na forma de níveis de cinza, ou número digital (ND), cujos valores variam de 0 a 255 (8 bits), apresentando resolução espacial de 30 m, exceto na banda termal (banda 6), com resolução de 120 m.

Tabela 3.2 - Coeficientes de calibração do TM - Landsat 5 a_b e b_b , irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera – k_b empregados na conversão da refletância monocromática em albedo e algumas características das bandas espectrais

Bandas	Comprimento de Onda (μm)	Resolução (m)	Coeficientes de Calibração ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$)		Irradiância Espectral no Topo da Atmosfera ($\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$)
			a	b	
1 (azul)	0,45 – 0,52	30	-1,52	193,0	1957
2 (verde)	0,52 – 0,60	30	-2,84	365,0	1826
3 (vermelho)	0,63 – 0,69	30	-1,17	264,0	1554
4 (IV-próximo)	0,76 – 0,79	30	-1,51	221,0	1036
5 (IV-médio)	1,55 – 1,75	30	-0,37	30,2	215,0
6 (IV-termal)	10,4 – 12,5	120	1,2378	15,303	-
7 (IV-médio)	2,08 – 2,35	30	-0,15	16,5	80,67

Fonte: Chander e Markham (2003) e Allen et al. (2002)

3.1.3.2 – Imagens OLI/TIRS - Landsat 8

Foram também utilizadas cinco imagens geradas pelo *Operational Land Imager - OLI* e *Thermal Infrared Sensor - TIRS* do satélite Landsat 8, órbita 216 e ponto 65, adquiridas junto ao USGS, correspondentes aos dias: 24 de junho (DAS 175), dia 12 de setembro (DAS 255), dia 28 de setembro (DAS 271), 14 de outubro (DAS 287) e 27 de novembro (DAS 331) de 2013. Cada imagem OLI é composta de nove bandas espectrais (bandas um a nove) cujas principais características estão representadas na Tabela 3.3. Já o TIRS possui duas bandas espectrais (bandas 10 e 11). Essas imagens correspondem à passagem do Landsat 8 às 09h30min (tempo local) no ano de 2013. A resolução espacial das imagens OLI é de 30 m, exceto a banda pancromática, com 15 m. As bandas 10 e 11, relativas ao sensor TIRS, possuem resolução de 100 m, mas são disponibilizadas com 30 m. Todas as imagens OLI/TIRS possuem resolução espectral de 12 bits, mas são disponibilizadas em 16 bits, o que significa que a intensidade de cada pixel varia entre 0 a 65.535, assegurando um maior nível de informação das áreas imageadas.

Tabela 3.3 - Coeficientes de calibração do OLI - Landsat 8 a_b e b_b , irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera – k_b empregados na conversão da refletância monocromática em albedo e algumas características das bandas espectrais

Bandas	Comprimento de Onda (μm)	Coeficientes de Calibração ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$)		Irradiância Espectral no Topo da Atmosfera* ($\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$)
		a	b	
1 OLI	0,43-0,45	-62,49131	756,73364	1627,3
2 OLI	0,45-0,51	-63,72469	771,66919	1812,5
3 OLI	0,53-0,59	-58,35032	706,58862	1932,1
4 OLI	0,64-0,67	-49,41915	598,43732	1579,9
5 OLI	0,85-0,88	-29,98809	363,13843	905,3
6 OLI	1,57-1,65	-7,55550	91,49276	242,6
7 OLI	2,11-2,29	-2,45779	29,76242	56,0
8 OLI	0,50-0,68	-55,66755	674,10181	-
9 OLI	1,36-1,38	-12,32335	149,22865	-
10 TIRS	10,60-11,19	0,10033	22,00180	-
11 TIRS	11.50-12.51	0,10033	22,00180	-

Fonte: USGS (2013) * - Obtidos por Silva (2014) com base em dados MODTRAN

3.1.3.3 – Imagens MODIS – Terra

Foram selecionadas imagens da Produtividade Primária Bruta - GPP (do inglês Gross Primary Production) e da Evapotranspiração Real – ETr,mod disponíveis nos produtos MOD17A2 e MOD16, respectivamente, relativas aos dias com imagens TM e OLI/TIRS dos anos de 2008 e 2013. Essas imagens MODIS, bem como as OLI/TIRS, foram obtidas no site: <https://wist.echo.nasa.gov/api/>. Os produtos MODIS são distribuídos em formato HDF (Hierarchical Data Format) e pode-se utilizar o software MRT (MODIS Reprojection Tool) para convertê-las no formato GeoTIFF, ou então usar uma versão ERDAS que possibilita a sua importação para posterior processamento das diversas etapas envolvendo os balanços de radiação e energia. Os produtos MODIS foram utilizados para comparação dos valores da GPP e evapotranspiração obtidos com base nas imagens TM e OLI/TIRS e algoritmo SEBAL/METRIC.

3.1.3.4 - Imagens MED - SRTM

Os dados do Modelo de Elevação Digital – MED da área de estudo foram obtidos junto ao sítio <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/download/>, na Embrapa Monitoramento por Satélite, com resolução de 90 m. Esses dados foram reprojetoados com vistas a compatibilizá-los com os dados TM e OLI/TIRS.

3.2 - Métodos empregados no balanço de energia

A determinação dos balanços de radiação e energia à superfície com SEBAL e o METRIC guardam muitos aspectos comuns, mas há diferenças marcantes que serão explicitadas nas seções seguintes.

3.2.1 - Saldo de radiação com o SEBAL

O diagrama da Figura 3.2 apresenta as diversas etapas a serem cumpridas para se obter o saldo de radiação à superfície – Rn. Os dados de entrada do modelo são imagens orbitais, que nesta pesquisa foram as imagens TM e OLI/TIRS, complementados com os seguintes dados meteorológicos (estação automática ou convencional): temperatura do ar – Ta (°C), umidade relativa – UR (%) e pressão atmosférica – Pa (KPa), obtidas próximo ao instante da passagem do satélite sobre a área de estudo, mais a radiação solar global diária (usada no cômputo do Rn diário). De um modo geral, o saldo de radiação à superfície - Rn ($W m^{-2}$) é dado por:

$$Rn = (1 - \alpha)R_{s,inc} + R_{ol,inc} - R_{ol,emi} - (1 - \varepsilon_0)R_{ol,inc} \quad (3.1)$$

em que: α é o albedo de cada pixel, $R_{s,inc}$ ($W m^{-2}$) é a radiação solar global (onda curta) incidente, $R_{ol,inc}$ ($W m^{-2}$) é a radiação de onda longa atmosférica incidente, $R_{ol,emi}$ ($W m^{-2}$) é a radiação de onda longa emitida por cada pixel e ε_0 é a emissividade de cada pixel.

3.2.1.1 – Determinação do albedo

O albedo é computado por meio da seguinte expressão (Bastiaanssen et al., 1998):

$$\alpha = \frac{(\alpha_{toa} - \alpha_{atm})}{\sigma_{oc}^2} \quad (3.2)$$

em que α_{toa} é o albedo de cada pixel sem correção atmosférica, α_{atm} representa o albedo da atmosfera (*path radiance*) e τ_{oc} é a transmitância atmosférica no domínio da radiação solar, que pode ser obtida pela expressão (ASCE-EWRI, 2005):

$$\tau_{oc} = 0,35 + 0,627 \exp \left[\frac{-0,00146 Pa}{K_t \cos Z} - 0,075 \left(\frac{W}{\cos Z} \right)^{0,4} \right] \quad (3.3)$$

em que Pa é a pressão atmosférica local (kPa), K_t é o coeficiente de turbidez do ar ($K_t = 1,0$ para ar limpo e $K_t = 0,5$ para ar extremamente turbido ou poluído, sendo utilizado $K_t = 1,0$ neste trabalho), Z é o ângulo zenital do Sol (extraído do metadado da imagem) e W é a água precipitável, obtida em função da UR (%) e Pa segundo expressão proposta por Garrison e Adler (1990). O valor do albedo da atmosfera varia de 0,025 a 0,004 (Allen et al., 2002) e adotou-se o valor de 0,03.

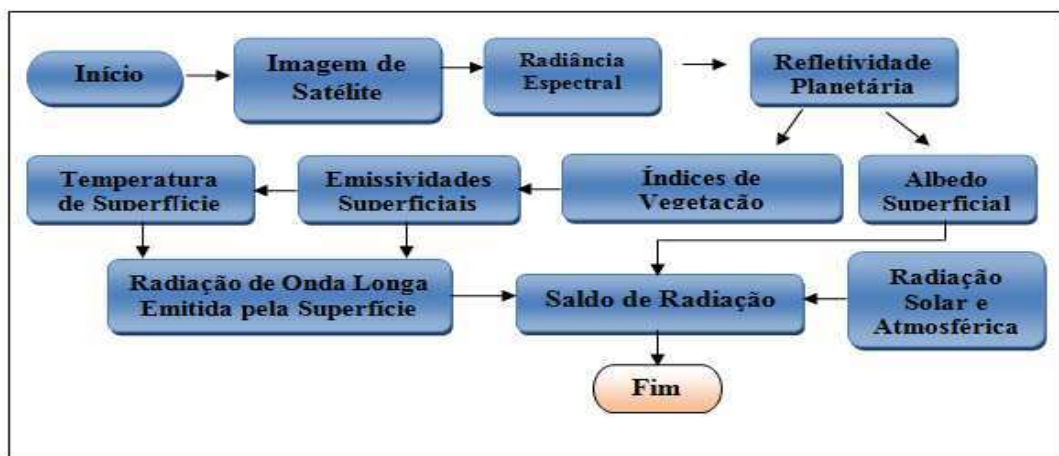


Figura 3.2 - Diagrama com as etapas computacionais do processamento de obtenção do saldo de radiação à superfície – Rn por meio do SEBAL

A determinação do albedo com correção atmosférica - α_{toa} é baseada em combinação linear da reflectância monocromática - r_b de cada uma das bandas reflectivas do TM - Landsat 5 (Equação 3.4) e do OLI - Landsat 8 (Equação 3.5), de acordo com as seguintes equações (BASTIAANSSEN et al., 1998b; ALLEN et al., 2002; SILVA et al., 2005):

$$\alpha_{toa} = 0,293 r_1 + 0,274 r_2 + 0,233 r_3 + 0,157 r_4 + 0,003 r_5 + 0,011 r_7 \quad (3.4)$$

e

$$\alpha_{toa} = 0,228r_1 + 0,233r_2 + 0,213r_3 + 0,180r_4 + 0,109r_5 + 0,028r_6 + 0,009r_7 \quad (3.5)$$

em que a reflectância de cada uma das bandas reflectivas é dada por (Bastiaanssen et al., 1998; Allen et al., 2002; Silva et al., 2005):

$$r_b = \frac{\pi L_b}{K_b \cos Z d_r} \quad (3.6)$$

em que L_b é a radiância espectral da banda b (1 a 5, mais banda 7, caso do TM, e 1 a 7, para o OLI), k_b é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera (para o TM ver Tabela 3.2, e para o OLI ver Tabela 3.3), $\cos(z)$ é o cosseno do ângulo zenital do Sol e d_r é a correção da excentricidade da órbita terrestre.

3.2.1.2 - Radiação solar global incidente via SEBAL

A radiação solar global incidente - $R_{s,inc}$ ($W m^{-2}$) representa o fluxo de radiação solar direta mais a difusa que atinge a superfície terrestre, que para condição de céu claro é dada por (BASTIAANSSEN, 2000; ALLEN et al., 2002; SILVA et al., 2011):

$$R_{s,inc} = S_o \cos Z d_r \tau_{oc} \quad (3.7)$$

em que: S_o é a constante solar ($1367 W m^{-2}$), Z é o ângulo zenital solar, d_r é a correção de excentricidade da órbita terrestre e τ_{oc} é a transmissividade atmosférica no domínio da radiação solar [Equação (3.3)].

3.2.1.3 – Radiação de onda longa incidente via SEBAL

A radiação de onda longa incidente à superfície - $R_{ol,atm}$ ($W m^{-2}$) representa o fluxo da radiação termal emitido pela atmosfera na direção da superfície e foi obtida através da equação de Stefan-Boltzmann:

$$R_{ol,atm} = \varepsilon_{atm} \cdot \sigma \cdot T_{ar}^4 \quad (3.8)$$

em que ε_{atm} é a emissividade atmosférica, obtida segundo Duarte et al. (2006), σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$) e T_{ar} é a temperatura do ar (K).

3.2.1.4 - Radiação de onda longa emitida via SEBAL

A radiação de onda longa emitida – $R_{ol,emi}$ (W m^{-2}) por cada pixel da área de estudo foi também obtida através da equação de Stefan-Boltzmann:

$$R_{ol,emi} = \varepsilon_o \sigma T_s^4 \quad (3.9)$$

em que ε_o é a emissividade da atmosfera (adimensional) e σ é a constante de Stefan-Boltzmann e T_s é a temperatura de superfície em (K). A emissividade da superfície representa a razão entre a radiação emitida pela superfície e aquela emitida pelo *corpo negro* à mesma temperatura, que em cada pixel da área estudada foi dada por (TASUMI, 2003):

$$\varepsilon_o = 0,95 + 0,01 * IAF \quad (3.10)$$

para $IAF < 3$ e $\varepsilon_o = 0,98$ para valores de $IAF > 3$, e IAF representa o Índice de Área Foliar de cada pixel obtido segundo Allen et al. (2002). A temperatura da superfície – T_s (K) foi obtida com base na equação de Planck invertida, qual seja:

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{NB} K_1}{L_6} + 1\right)} \quad (3.11)$$

em que: K_1 e K_2 são constantes de calibração da banda termal, respectivamente iguais a $607,76 \text{ W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ e $1260,56 \text{ K}$ (Markham e Barker, 1986); ε_{NB} é a emissividade de cada pixel no domínio da banda termal (Allen et al., 2002; 2007) e L_6 é a radiância da banda termal.

3.2.2 – Saldo de radiação com o METRIC

No balanço radiativo segundo o METRIC são utilizadas imagens que propiciam a determinação da T_s e do albedo, mais imagens do Modelo de Elevação Digital, complementados por dados coletados em estação meteorológica (convencional ou automática). A equação do saldo de radiação é a mesma empregada no SEBAL e no diagrama da Figura 3.3 está representado o esquema de obtenção do balanço radiativo segundo o METRIC.

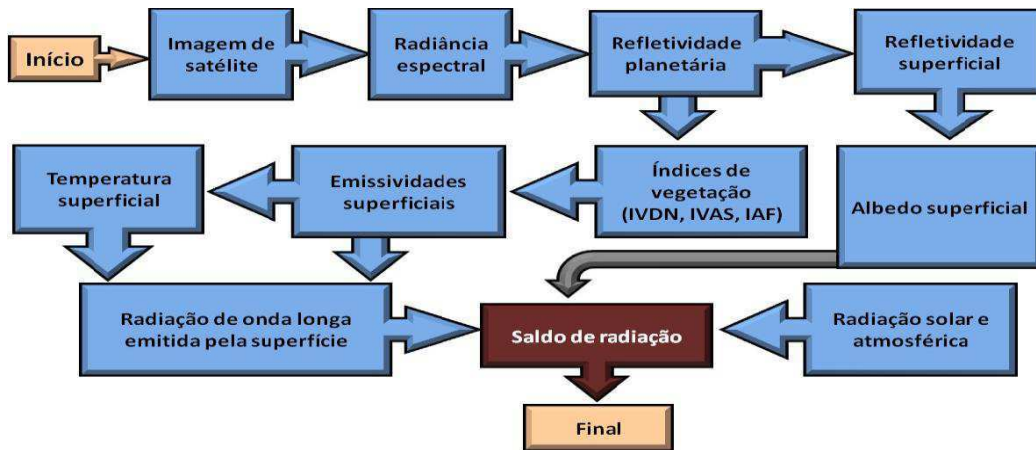


Figura 3.3 - Diagrama com as etapas computacionais do processamento de obtenção do saldo de radiação à superfície – Rn por meio do METRIC

3.2.2.1 – Determinação do albedo com o METRIC

O albedo da superfície é dado pela razão entre a radiação solar refletida pela radiação solar global incidente à superfície em todo o domínio da radiação de onda curta à superfície (0,3 a 3,2 μm). No METRIC o cômputo do albedo da superfície - α_s é obtido através da combinação linear das refletâncias monocromáticas de cada banda:

$$\alpha_s = \sum_{b=1}^i (\rho_{s,b} \cdot \omega_b) \quad (3.12)$$

em que ω_b expressa o peso de cada banda (Tabela 3.3), que deve ser multiplicado pela refletância de cada banda do TM – $\rho_{s,b}$ para obtenção do albedo da superfície, sendo que a refletância de cada banda corrigido os efeitos atmosféricos é dada pela razão entre a radiação solar refletida por cada banda e aquela incidente, ambas à superfície, o que pode ser feito segundo expressão (ALLEN et al., 2007):

$$\rho_{s,b} = \frac{\rho_{b,toa} - \rho_{atm,b}}{\tau_{inc,b} \tau_{asc,b}} \quad (3.13)$$

em que: $\rho_{s,b}$ é a refletividade do pixel à superfície, $\rho_{b,toa}$ é a refletividade da banda b no topo da atmosfera, $\rho_{atm,b}$ é a refletância atmosférica, $\tau_{inc,b}$ é a transmissividade atmosférica para a radiação solar incidente e $\tau_{asc,b}$ é a transmissividade para a radiação solar refletida pela superfície. A refletância do pixel sem correção atmosfera (ou refletância planetária) é estimada de acordo com a seguinte equação (ALLEN et al., 2007):

$$\rho_{b,toa} = \frac{\pi L_b}{K_b \cos\theta d_r} \quad (3.14)$$

em que: L_b é a radiância espectral (CHANDER e MARKHAM, 2003), k_b é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera (Tabela 3.1), $\cos(\theta)$ é o cosseno do ângulo de incidência dos raios solares e a normal à superfície e d_r é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol. O $\cos(\theta)$ para pixels que possuem inclinação diferente de zero é dado por (ALLEN et al., 2007):

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \text{sen}(\delta)\text{sen}(\phi) \cos(s) - \text{sen}(\delta) \cos(\phi) \text{sen}(s) \cos(\gamma) \\ & + \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(s) \cos(\omega) \\ & + \cos(\delta) \text{sen}(\phi)\text{sen}(s) \cos(\gamma) \cos(\omega) \\ & + \cos(\delta) \text{sen}(\gamma)\text{sen}(s)\text{sen}(\omega) \end{aligned} \quad (3.15)$$

em que δ é a declinação do Sol, ϕ é a latitude central da cena, s é a inclinação do pixel, onde $s = 0$ para horizontal e $S = \frac{\pi}{2}$ radiano para declividade vertical; ω é o ângulo horário (em radiano), onde $\omega = 0$ ao meio-dia, negativo de manhã e positivo a tarde; γ é o ângulo azimutal da superfície onde $\gamma = 0$ para declividades orientadas para o sul, $\gamma = \frac{-\pi}{2}$ para declividades orientadas a leste, $\gamma = \frac{+\pi}{2}$ para declividades a oeste e $\gamma = \pm\pi$ para declividades orientadas ao norte. A refletividade da atmosfera na banda b - $\rho_{atm,b}$, é dada por (ALLEN et al., 2007):

$$\rho_{atm,b} = C_b(1 - \tau_{inc,b}) \quad (3.16)$$

em que C_b é o coeficiente derivado de modelo de transferência radiativa (Tabela 3.3).

Já a transmitância $\tau_{inc,b}$ é dada por (ALLEN et al., 2007):

$$\tau_{inc,b} = C_1 \exp \left[\frac{C_2 P a}{K t \cos Z} - \frac{C_3 W + C_{24}}{\cos Z} \right] + C_5 \quad (3.17)$$

em que C_1 , C_2 , C_3 , C_4 e C_5 são os coeficientes derivados de modelo de transferência radiativa (Tabela 3.4), P_a é a pressão atmosférica (kPa), W é a água precipitável (mm), Kt é o coeficiente de turbidez atmosférica (valor padrão = 1,0) e Z é o ângulo zenital solar. Para o cálculo da transmitância $\tau_{asc,b}$ se usa a seguinte expressão (Allen et al., 2007):

$$\tau_{asc,b} = C_1 \exp \left[\frac{C_2 P}{K t \cos \eta} - \frac{C_3 W + C_{24}}{\cos \eta} \right] + C_5 \quad (3.18)$$

em que: η é o ângulo de visão do sensor relativo a perpendicular de uma superfície plana e horizontal. No caso do Landsat, que tem ângulo de visão no nadir, o $\cos \eta = 1$.

Tabela 3.4 - Constantes de calibração $C_1 - C_5$ e C_b do TM - Landsat 5

Coeficiente	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 7
C_1	0,987000	2,319000	0,95100	0,375000	0,234000	0,365000
C_2	-0,00071	-0,00016	-0,00033	-0,00048	-0,00101	-0,00097
C_3	0,000036	0,000105	0,000280	0,005018	0,004336	0,004296
C_4	0,088000	0,043700	0,087500	0,135500	0,056000	0,015500
C_5	0,078900	-1,26970	0,101400	0,662100	0,775700	0,639000
C_b	0,640000	0,310000	0,286000	0,189000	0,274000	0,186000
w_b	0,254	0,140	0,147	0,311	0,103	0,036

Fonte: Allen et al. (2007)

3.2.2.2 – Radiação solar global incidente no METRIC

No METRIC a radiação de onda curta incidente - $R_{s,inc}$ ($W m^{-2}$) é obtida por meio da mesma equação empregada no SEBAL, exceto pelo $\cos Z$, que deve ser substituído pelo $\cos \theta$ (BASTIAANSSEN, 2000; ALLEN et al., 2002; SILVA e Bezerra, 2008). O esquema de cômputo da $R_{s,inc}$ está ilustrado na Figura 3.3.

3.2.2.3 – Radiação de onda longa incidente no METRIC

Não há diferença entre o cômputo da radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção da superfície - $R_{ol,atm}$ entre os algoritmos SEBAL e METRIC.

3.2.2.4 - Radiação de onda longa emitida pelo METRIC

A expressão de cálculo da $R_{ol,emi}$ segundo o METRIC e SEBAL é a mesma, e o que diferencia uma proposta da outra é que o METRIC recomenda que se efetive correção atmosférica para a radiância da banda termal, o que deve ser feito por (ALLEN et al., 2007):

$$L_{6,cor} = \frac{(L_6 - R_p)}{\tau_{NB}} - (1 - \epsilon_{NB})R_{sky} \quad (3.19)$$

em que $L_{6,cor}$ ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$) é a radiância da banda termal corrigida, L_6 é a radiância da banda termal obtida ao nível orbital ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$), R_p ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$) é a radiância de trajetória na faixa espectral da banda 6, R_{sky} é a radiância de onda longa emitida pela atmosfera na direção da superfície para céu limpo e τ_{NB} é a transmitância atmosférica da banda termal (ALLEN et al., 2007). Na Tabela 3.5 estão representados os dados empregados no cômputo do saldo de radiação nos dias selecionados para a pesquisa.



Figura 3.4 – Diagrama para o cálculo da radiação solar em superfície inclinada

Tabela 3.5 - Variáveis de entrada para o cálculo do saldo de radiação – R_n, distância relativa Terra / Sol – dr, declinação do Sol – δ, ângulo horário instantâneo – ω, cosseno do ângulo zenital solar – cos Z, pressão de vapor d’água - e_a e temperatura do ar - T_{ar} referentes ao instante da passagem do satélite nos dias seleccionados para a pesquisa

Data	dr	δ	ω	cos Z	e _a	T _{ar}
	–	Rad	rad	–	kPa	°C
29/08/08	0,98	0,153	-0,54	0,81	1,84	29,1
14/09/08	0,99	0,044	-0,51	0,85	1,86	29,5
01/11/08	1,02	-0,269	-0,50	0,88	1,90	29,7
17/11/08	1,02	-0,234	-0,52	0,87	2,28	29,5
19/12/08	0,98	0,034	-0,53	0,83	1,77	29,6
24/06/13	0,97	0,409	-0,08	0,75	1,67	25,9
12/09/13	0,99	0,057	-0,47	0,88	1,86	28,5
28/09/13	0,99	0,054	-,047	0,90	1,62	30,0
14/10/13	1,00	-0,162	-0,43	0,91	1,77	30,2
27/11/13	1,02	-0,335	-0,40	0,90	2,01	30,1

3.2.3 - Fluxo de calor no solo com o SEBAL/METRIC

O fluxo de calor no solo – G (W m⁻²) representa a taxa de calor armazenado pelo solo e vegetação pelo processo de condução. Nas aplicações em geral do SEBAL e também do METRIC se utiliza uma parametrização proposta por Bastiaanssen (2000), com bons resultados, qual seja:

$$G = (T_s - 273,15) (0,0038 + 0,0074 \alpha) (1 - 0,98 \text{IVDN}^4) R_n \quad (3.20)$$

onde T_s é a temperatura da superfície (K), α é o albedo da superfície) e IVDN é o índice de vegetação da diferença normalizada. Para efeito de cálculo do fluxo de calor no solo para corpos de água (IVDN < 0), assumiu-se $G = 0,3 R_n$ (ALLEN et al., 2002; SILVA e BEZERRA, 2006; SILVA et al., 2011).

3.2.4 - Fluxo de calor sensível no SEBAL/METRIC

Na Figura 3.5 está representado um diagrama com as etapas computacionais do processo iterativo para a obtenção do fluxo de calor sensível – H ($W m^{-2}$) segundo o SEBAL/METRIC. O fluxo de calor sensível é estimado com base na velocidade do vento e temperatura da superfície usando uma calibração interna da diferença de temperatura próxima à superfície entre dois níveis, segundo a seguinte equação (BASTIAANSEN et al., 1998b; SILVA e BEZERRA, 2006; ALLEN et al., 2007; MENDONÇA et al., 2012):

$$H = \rho c_p \frac{dT}{r_{ah}} \quad (3.21)$$

em que ρ é a densidade do ar ($kg m^{-3}$), c_p é o calor específico do ar à pressão constante ($1004 J kg^{-1} K^{-1}$), dT representa o gradiente de temperatura do ar acima da vegetação e r_{ah} é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor sensível ($s m^{-1}$). Inicialmente, são reunidas informações sobre a velocidade do vento – u ($m s^{-1}$) e altura média da vegetação - h (m) na estação meteorológica interior à área de estudo. Considerou-se um raio igual à metade da resolução espacial do satélite, no caso 15 m e a altura de obtenção de u , que é de 10,0 m. Dessa forma, obteve-se o coeficiente de rugosidade z_{0m} na estação meteorológica em função da altura média da vegetação, segundo equação de Brutsaert (1982): $z_{0m} = 0,12 h$. Os dois problemas centrais no cômputo de H se concentram em: a) na determinação da resistência aerodinâmica ao processo de transferência de calor sensível – r_{ah} ($s m^{-1}$) e b) no cômputo da diferença de temperatura do ar em dois níveis acima da vegetação – dT . Para tanto, são selecionados em cada cena dois pixels em condições extremas de umidade e temperatura, que são denominados pixel seca e pixel úmido, como se demonstra abaixo.

3.2.4.1 – Determinação da resistência aerodinâmica

No SEBAL/METRIC o cálculo de r_{ah} ($s\ m^{-1}$) utiliza a velocidade do vento extrapolada para 200 m acima da superfície e um diagrama de iteração de correção da estabilidade da atmosfera baseado na teoria de Monion-Obukov. Como r_{ah} e H são desconhecidos para cada pixel na imagem realiza-se um processo iterativo. Para primeira iteração r_{ah} é estimado assumindo-se uma condição de estabilidade neutra da atmosfera, dada por:

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)}{u^* \cdot K} \quad (3.22)$$

em que: u^* é a velocidade de fricção, z_1 e z_2 são as alturas acima da superfície (0,1 m e 2,0 m, respectivamente) já utilizadas por Bastiaanssen et al. (1998) e Allen et al. (2002) e K é a constante de Von Karman (0,41). Na primeira iteração a velocidade de fricção de cada pixel é estimada por:

$$u_* = \frac{Ku_{200}}{\ln\left(\frac{200}{z_{om}}\right)} \quad (3.23)$$

onde u_{200} é a velocidade do vento a 200 m da superfície (obtido por extrapolação de u medida na estação meteorológica) e Z_{om} é o comprimento de rugosidade da superfície para cada pixel, que é obtido como base no Índice de Vegetação com ajuste do Solo - IVAS (SILVA e BEZERRA, 2006; ALLEN et al., 2002; 2007). A velocidade u_{200} é considerada constante sob toda a cena estudada, permitindo o uso da relação linear dT e T_s para posteriores estimativas de H . O nível de 200 m é denominado de “blending height”, e se assume que os efeitos da rugosidade da superfície não modificam o fluxo de ar naquele nível e, conseqüentemente, u_{200} pode ser considerado constante, podendo ser obtido por:

$$u_{200} = u^* \frac{\ln\left(\frac{200}{z_{om}}\right)}{K} \quad (3.24)$$

u^* é a velocidade de fricção na estação meteorológica, K é a constante de Von Karman (0,41) e z_{om} (m) foi obtido para cada pixel em função do IVAS, através da seguinte expressão proposta por Bastiaanssen (2000):

$$Z_{om} = \exp(-5,809 + 5,62 \cdot IVAS) \quad (3.25)$$

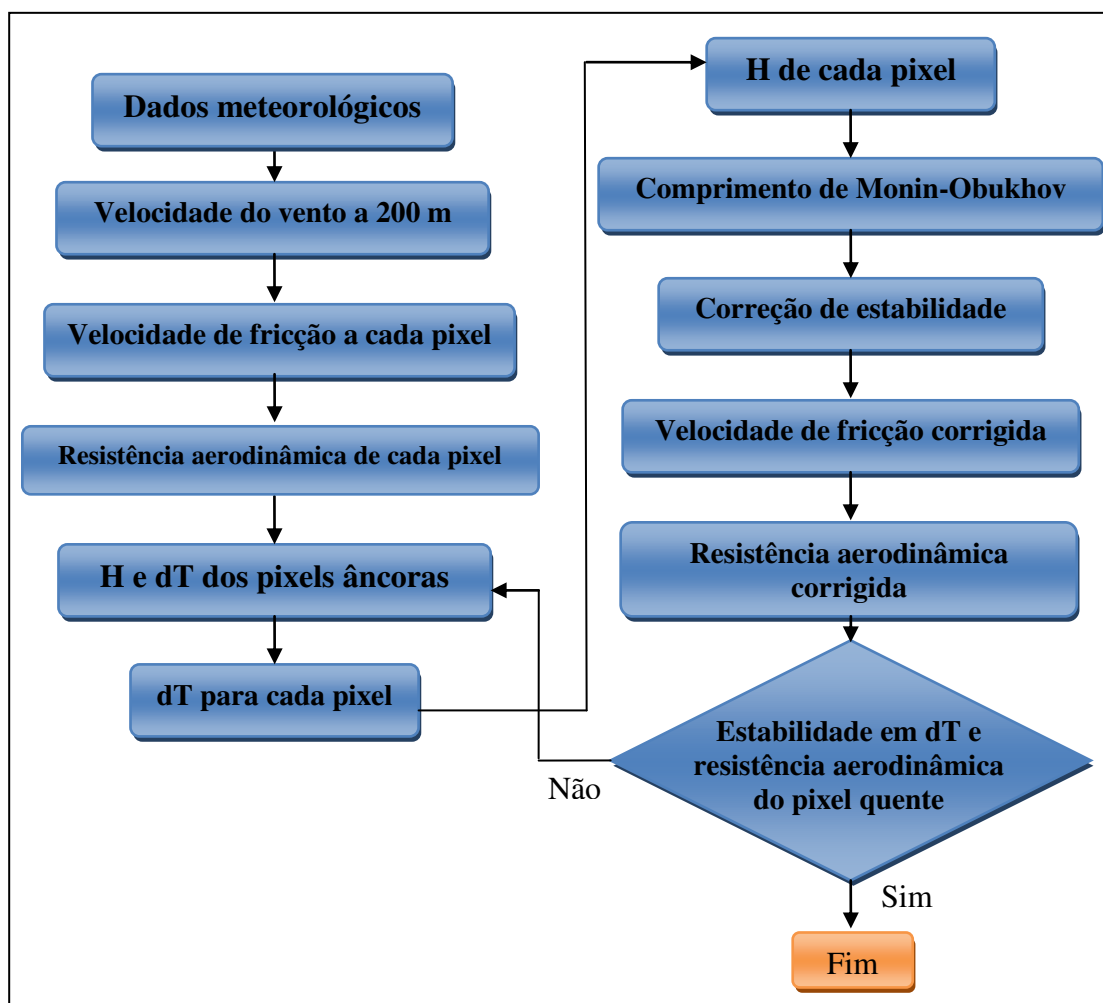


Figura 3.5 - Fluxograma das etapas computacionais do processo iterativo para a obtenção do fluxo de calor sensível – H pelo SEBAL/METRIC

Tabela 3.6 - Valores da velocidade do vento aos níveis de 10 e 200 metros referentes aos dias selecionados para a pesquisa

	29	14	01	17	19	24	12	28	14	27
Data	Ago	Set	Nov	Nov	Dez	Jun	Set	Set	Out	Nov
	2008	2008	2008	2008	2008	2013	2013	2013	2013	2013
U_{10} ($m\ s^{-1}$)	2,1	2,3	1,6	1,5	1,3	2,7	4,1	3,1	3,8	2,4
U_{200} ($m\ s^{-1}$)	3,1	3,4	2,3	2,2	1,9	3,9	6,0	4,6	5,6	3,5

3.2.4.2 – Determinação das constantes da função dT

O cômputo da diferença de temperatura próxima à superfície dT (°C) para cada pixel foi computada através da relação linear entre dT e T_s :

$$dT = a + bT_s \quad (3.26)$$

em que: a e b são coeficientes da relação linear e são obtidos nesse processo através das componentes do balanço de energia nos pixels frio e quente. O pixel frio pode ser escolhido em um ponto sobre áreas agrícolas com características biofísicas similares a cultura de referência (alfafa). No SEBAL se considera que no pixel frio $LE = R_n - G$, no METRIC é considerado que $LE = 1,05 ET_o \lambda$, onde λ é o calor latente de vaporização da água e ET_o é a evapotranspiração de referência que é estimada segundo o método da FAO 56 - Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998).

3.2.4.3 - Determinação do dT e H no SEBAL

O pixel frio foi escolhido no centro do açude de São Gonçalo, onde se assumiu que $H = 0$ e, conseqüentemente, $dT = 0$ e a densidade de fluxo de calor latente foi calculada por $LE = R_n - G$. Já o pixel quente foi identificado em área com baixa cobertura vegetal ($IAF < 0,2$) e onde se assumiu $LE = 0$. Dessa forma, o valor de H nesse pixel é dado por:

$$R_n - G = \frac{\rho c_p (a + b T_s)}{r_{ah}} \quad (3.27)$$

em que ρ (kg m^{-3}) é a massa específica do ar, c_p é o calor específico a pressão constante ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) e T_s (°C), R_n (W m^{-2}) e G (W m^{-2}) são obtidos no pixel quente da imagem. Com base nesses valores obtém-se:

$$a + b T_s = \frac{r_{ah}(R_n - G)}{\rho c_p} \quad (3.28)$$

Como no pixel frio $dT = 0$, ou seja, $dT = a + b T_s = 0$, tem-se um sistema com duas equações e duas incógnitas, possibilitando o cálculo de a e b . Com os valores de a e b , e da resistência aerodinâmica em cada pixel pode-se obter inicialmente um mapa temático de H .

Os valores de H obtidos inicialmente não representam adequadamente o fluxo de calor sensível de cada pixel por serem valores iniciais de um processo iterativo onde, nas etapas

seguintes, é considerada a condição de estabilidade de cada pixel. Para isso, foi utilizado o comprimento de Monin-Obukhov para identificar a condição de estabilidade atmosférica de cada pixel e efetivar a correção da estabilidade para o transporte de *momentum* e calor sensível. Esses últimos, uma vez determinados, possibilitam corrigir a velocidade de fricção e, em consequência, a resistência aerodinâmica ao transporte de calor. Depois de obtidos os valores desses parâmetros, calcula-se novamente dT e, posteriormente, H com os novos valores de r_{ah} (BASTIAANSSEN, 1995; ALLEN et al., 2002; SILVA e BEZERRA, 2006; MENDONÇA et al., 2012). Esses passos são repetidos até ser verificada a estabilidade dos valores de dT e de r_{ah} no pixel quente. Mediante esse procedimento, são realizadas entre cinco e sete iterações.

3.2.4.3 - Determinação do dT e H no METRIC

No METRIC se considera que no pixel quente $H_q = (Rn - G)_q - LE_q$ e que no pixel frio $H_f = (Rn - G)_f - LE_f$, e nesse sentido o dT para o pixel frio é calculado por:

$$dT_f = \frac{H_f r_{ah_f}}{\rho_f C_p} \quad (3.29)$$

onde r_{ah_f} é estimado para as condições de estabilidade e para a rugosidade da superfície do pixel frio; ρ_f é a densidade do ar calculado para o pixel frio. Os coeficientes a e b são determinados utilizando dois pares de valores para dT e T_s :

$$a = \frac{dT_q - dT_f}{Ts_q - Ts_f} \quad (3.30)$$

e

$$b = \frac{dT_q - a}{Ts_q} \quad (3.31)$$

onde Ts_q e Ts_f são as temperaturas da superfície nos pixels quente e frio ajustados ao dado de elevação para cada pixel na imagem usando o modelo digital de elevação.

Com a expressão do ΔT e o mapa da resistência r_{ah} , pode-se obter um mapa inicial de H . Os valores obtidos não representam adequadamente o H de cada pixel e servem, tão

somente, como valores iniciais de um processo iterativo, em que nas etapas seguintes são consideradas, efetivamente, as condições de estabilidade de cada pixel. Nesse sentido, o comprimento de Monin-Obukhov – $L(m)$ é utilizado para identificar as condições de estabilidade da atmosfera, sendo computado pela seguinte expressão (ALLEN *et al.*, 2002; SILVA e BEZERRA, 2006; BEZERRA *et al.*, 2008; ALLEN *et al.*, 2007):

$$L = -\frac{\rho c_p u_*^3 T_s}{k \cdot g \cdot H} \quad (3.32)$$

em que: ρ é a densidade do ar, c_p é o calor específico do ar à pressão constante, u_* é a da velocidade de fricção de cada pixel das imagens ($m s^{-1}$), T_s é a temperatura da superfície (K) em cada pixel, g é o módulo do campo gravitacional terrestre ($9,81 m s^{-2}$) e H é o fluxo de calor sensível ($W m^{-2}$), pixel a pixel, obtido inicialmente considerando a condição de neutralidade. Os valores de L definem as condições de estabilidade da seguinte forma: se $L < 0$, a atmosfera é considerada instável; se $L > 0$, a atmosfera é considerada estável e se $L = 0$ a atmosfera é considerada neutra. Dependendo das condições atmosféricas, os valores das correções de estabilidade para o transporte de momentum – ψ_m e de calor – ψ_h deverão ser considerados. Para isto, utiliza-se das formulações: se $L < 0$, a atmosfera é considerada instável; se $L > 0$, a atmosfera é considerada estável; e se $L = 0$ a atmosfera é considerada neutra.

Uma vez identificada a condição de estabilidade atmosférica, são corrigidos os valores da velocidade de fricção e, em seguida, da resistência aerodinâmica de cada pixel, o que é efetuada por meio das expressões (BASTIAANSEN *et al.*, 1998; ALLEN *et al.*, 2002; SILVA e BEZERRA, 2006; BEZERRA *et al.*, 2008; ALLEN *et al.* 2007):

$$u_* = \frac{u_{200} \cdot k}{\ln\left(\frac{200}{z_{0m}}\right) - \psi_{m(200m)}} \quad (3.33)$$

onde u_{200} é a velocidade do vento a 200 m ($m s^{-1}$), k é a constante de von Karman (0,41), z_{0m} é o coeficiente de rugosidade de cada pixel (m) e $\psi_{m(200m)}$ é a correção da estabilidade para o transporte de momentum a 200 m. De posse dos valores de u_* corrigidos, são obtidos os valores corrigidos da resistência aerodinâmica ao transporte de calor – r_{ah} (sm^{-1}) qual seja:

$$r_{ah} = \frac{\ln \frac{z_2}{z_1} - \psi_{h(z_2)} + \psi_{h(z_1)}}{u_* \cdot k} \quad (3.34)$$

onde $z_2 = 2,0$ m, $z_1 = 0,1$ m, e $\psi_{h(z_2)}$ e $\psi_{h(z_1)}$ são as correções de estabilidade para o transporte de calor a 2,0 m e 0,1 m, respectivamente (SILVA e BEZERRA, 2006; ALLEN et al., 2002; 2007).

Depois de obtidos os valores dessas variáveis, retorna-se ao cômputo da função da diferença de temperatura dT , repetindo-se os cálculos mencionados anteriormente até que se obtenha estabilidade nos valores sucessivos da diferença de temperatura – dT e da resistência aerodinâmica – r_{ah} em cada pixel da imagem.

3.2.5 - Fluxo de calor latente no SEBAL/METRIC

O fluxo de calor latente – LE ($W m^{-2}$) segundo o SEBAL/METRIC é obtido como resíduo do BE, qual seja:

$$LE = R_n - G - H \quad (3.35)$$

3.2.6 - Evapotranspiração diária com o SEBAL/METRIC

Uma das diferenças mais marcantes entre o SEBAL e METRIC reside no cômputo da evapotranspiração diária, conforme será verificado a seguir.

3.2.6.1 - Evapotranspiração diária com o SEBAL

Uma vez obtido os componentes do balanço de energia R_n , G , H e LE , em base instantânea, se procede a determinação da Fração Evaporativa Instantânea – FE_{ins} que é dada por: $FE_{ins} = LE / (R_n - G)$, se admite que o mesmo se mantém constante ao longo do dia, o que possibilita de assumir que a $FE_{ins} = FE_{24h}$. Portanto, pode-se obter o fluxo de calor latente diário – LE_{24h} por meio da expressão:

$$LE_{24h} = FE_{int} R_{n,24h} \quad (3.36)$$

em que $R_{n,24h}$ é o saldo de radiação diário, que pode ser obtido, conforme Bastiaanssen et al. (1998), por:

$$R_{n,24h} = R_{s,24h} (1 - \alpha) - a \tau_{oc,24h} \quad (3.37)$$

em que $R_{s,24h}$ é a radiação solar global diária ($W m^{-2}$) medida na área de estudo, α é o albedo, a é uma constante (considerada igual 123 na pesquisa) e $\tau_{oc,24h}$ é a transmitância atmosférica média diária. Para se obter a ETr diária se integra o LE_{24h} ao longo do dia e se divide o mesmo pelo calor de vaporização da água, ou seja:

$$ETr = 0,035 FE_{int} R_{s,24h} (1 - \alpha) - 123 \tau_{oc,24h} \quad (3.38)$$

3.2.6.2 - Evapotranspiração diária com o METRIC

Uma vez estimado o LE instantâneo para cada pixel da área de estudo, pode-se converter seu valor em lâmina de água perdida da superfície para a atmosfera, ou seja, evapotranspiração real horária – ETr (mm h⁻¹) pela seguinte equação (ALLEN et al., 2007):

$$ET_{r,h} = \frac{3600 LE}{(2,501 - 0,00236T_s)10^6} \quad (3.39)$$

em que: Ts é a temperatura da superfície (°C).

A extrapolação da evapotranspiração real horária – ET_{r,h} para o período diário – ET_{r,24h}, reclama o cálculo prévio da fração da evapotranspiração – FET_o de cada pixel:

$$FET_{o,h} = \frac{ET_h}{ET_{o,h}} \quad (3.40)$$

em que ET_{o,h} é a evapotranspiração de referência horária segundo FAO-56 (ALLEN et al., 1998).

A evapotranspiração diária é estimada assumindo que a fração da evapotranspiração FET_{o,h}, calculada para hora de aquisição da imagem, se assemelha ao seu valor diário - FET_{o,24h}. Logo, a evapotranspiração real diária – ET_{r,24h} (mm) é estimada por:

$$ET_{r,24h} = C_{rad}(FET_{o,h})(ET_{o,24h}) \quad (3.41)$$

em que ET_{o,24h} é a evapotranspiração de referência diária e *C_{rad}* é um termo de correção para terrenos declivosos para corrigir a variação em 24h versus a disponibilidade instantânea de energia (Allen et al., 2007).

3.2.7 - Mapa da evapotranspiração mensal

A evapotranspiração real mensal – ETr,mes foi obtida assumindo-se que a razão entre a ETr diária de cada pixel da área de estudo e a evapotranspiração de referência diária – ET_{o,24h} pode ser considerada constante para o mês com imagem TM ou OLI/IRTS. Portanto, a ETr,mes seria dada pelo produto do mapa obtido pela razão ET_{r,24h} / ET_{o,24h} pela ET_{o,mês}.

3.2.8 – Validação da evapotranspiração SEBAL/METRIC

Para validação dos resultados da ETr diária obtida pelo SEBAL/METRIC, foram selecionados alguns pomares de coqueiros e/ou consórcios de coqueiros/bananeira, talhão com arrozeiro e área de vegetação nativa, e se estimou a ETr obtida pelo método da FAO-56, em que a $ETr = K_a K_c ETo$, em que K_a é um coeficiente de ajuste (caso das culturas com cobertura parcial do solo), K_c é o coeficiente de cultura e ETo é a evapotranspiração de referência medida localmente em estação meteorológica automática. Para tanto, utilizou-se o coeficiente de cultura - K_c do coqueiro anão (SOUSA et al., 2011; MIRANDA et al., 2007), do arrozeiro (DOORENBOS & KASSAN, 1979) e da bananeira (COELHO et al., 2012).

3.3 - Método de cômputo da produtividade primária bruta

A produtividade primária bruta – GPP corresponde à fotossíntese bruta (XIAO et al., 2004; SILVA et al., 2013). As equações empregadas no cômputo da GPP são fundamentadas no modelo proposto por Monteith (1972):

$$GPP = RFAA \cdot \varepsilon = RFA \cdot FPAR \cdot \varepsilon \quad (3.42)$$

onde RFAA é a radiação fotossinteticamente absorvida – RFAA ($W m^{-2}$) pela vegetação, ε ($g C MJ^{-1}$) é a eficiência do uso de luz da vegetação e FPAR representa a fração da radiação RFA que é absorvida pela vegetação, sendo esta última estimada em função da radiação solar global diária – $R_{s,24h}$ segundo Bastiaanssen e Ali (2003):

$$RFA = 0,48 \cdot R_{s,24h} (W m^{-2}) \quad (3.43)$$

em que: $R_{s,24h}$ representa a radiação solar global diária (Wm^{-2}) (Tabela 3.5)

A Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida – RFAA ($W m^{-2}$) pode ser obtida em função do índice de vegetação da diferença normalizada – IVDN, segundo Bastiaanssen e Ali (2003):

$$RFAA = RFA \cdot (-0,161 + 1,257 IVDN) \quad (3.44)$$

A eficiência do uso de luz ε ($g C MJ^{-1}$), embora dependa de outros elementos da comunidade vegetal, pode ser quantificada segundo o modelo de Field et al. (1995):

$$\varepsilon = \varepsilon' \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot FE \quad (3.45)$$

em que ε' representa a eficiência máxima de uso da luz em da comunidade vegetal (cujo valor utilizado nesta pesquisa foi de $2,5 \text{ gC MJ}^{-1}$), FE é a fração evaporativa (obtida com o SEBAL), T_1 e T_2 refletem a contribuição da temperatura no processo fotossintético, dados por Bastiaanssen (2000) e Bastiaanssen e Ali (2003):

$$T_1 = 0,8 + 0,02T_{opt} - 0,0005T_{opt}^2 \quad (3.46)$$

$$T_2 = \frac{1}{1 + \exp(0,2T_{opt} - 10 - T_{mon})} \frac{1}{1 + \exp[0,3(-T_{opt} - 10 + T_{mon})]} \quad (3.47)$$

em que T_{opt} é a temperatura média do ar do mês de máximo IAF ou IVDN ($^{\circ}\text{C}$) e T_{mon} é temperatura do ar média diária ($^{\circ}\text{C}$). A Figura 3.6 ilustra o processo de cômputo da GPP, empregada na pesquisa. Nas Tabelas 3.7 e 3.8 estão representados os dados empregados no cômputo da GPP dos dias selecionados na pesquisa.

Tabela 3.7 – Valores da radiação solar diária por ocasião das datas em que foram geradas as imagens TM – Landsat 5 ano 2008 e OLI/TIRS – Landsat 8 ano 2013

Data	29 Ago 2008	14 Set 2008	01 Nov 2008	17 Nov 2008	19 Dez 2008	24 Jun 2013	12 Set 2013	28 Set 2013	14 Out 2013	27 Nov 2013
Rs (MJ m^{-2})	25,5	25,2	27,4	27,5	28,9	20,1	26,7	27,2	27,4	21,6

Tabela 3.8 – Datas das imagens do TM e OLI/TIRS, Valores da T_{opt} ($^{\circ}\text{C}$), T_{mon} ($^{\circ}\text{C}$), T_1 e T_2 referentes aos dias selecionados para a pesquisa

Mês	29 Ago 2008	14 Set 2008	01 Nov 2008	17 Nov 2008	19 Dez 2008	24 Jun 2013	12 Set 2013	28 Set 2013	14 Out 2013	27 Nov 2013
T_{opt}	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8	27,8
T_{mon}	29,1	29,2	29,5	28,6	29,6	25,9	28,5	30,0	30,2	30,1
T_1	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
T_2	0,93	0,93	0,92	0,94	0,92	0,97	0,94	0,91	0,91	0,91

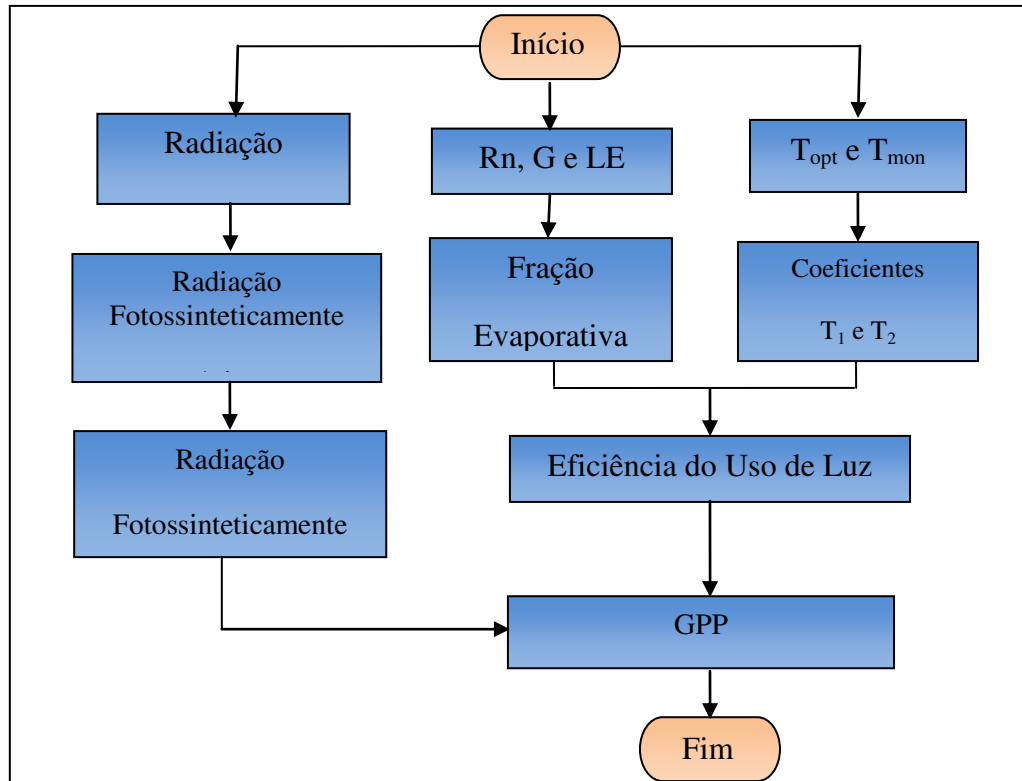


Figura 3.6 - Fluxograma para o cálculo da GPP

3.4 – Validação dos resultados: análise de erros

Para análise da precisão das estimativas da ET_{sebal} foram utilizados o erro relativo médio (ERM), erro absoluto médio (EAM) e a raiz do erro quadrado médio (REQM):

$$EAM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |ET_{SEBAL} - ET_{FAO}| \quad (3.48)$$

$$EMR = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{ET_{SEBAL} - ET_{FAO}}{ET_{FAO}} \right| \quad (3.49)$$

$$REQM = \sum_{i=1}^N \frac{(ET_{SEBAL} - ET_{FAO})^2}{N} \quad (3.50)$$

em que ET_{sebal} e ET_{FAO} correspondem, respectivamente, aos valores da evapotranspiração segundo o SEBAL e o método da FAO-56, e N é o número de pares dessas variáveis.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Resultados dos balanços de radiação e energia

4.1.1 - Mapas temáticos do albedo

Nas Figuras 4.1 e 4.2 estão representados os mapas do albedo elaborados a partir das imagens TM – Landsat 5 no ano de 2008 e OLI- Landsat 8 no ano de 2013, para a área de estudo. As áreas com albedo inferior a 0,08 compreendem os corpos de água (açude de São Gonçalo e leito de rios e riachos interiores ao recorte). Os valores superiores a 35% representam área urbana, mas também pixels com presença de nuvens, caso da imagem de 14 de setembro de 2008. As áreas agrícolas do Perímetro Irrigado da São Gonçalo - PISG apresentam albedo variado, mas com maior frequência entre 0,15 e 0,20, ocorrendo o mesmo nas áreas serranas do recorte. Dado a grande heterogeneidade da área não fica bem nítida a diferenciação entre cultivos irrigados e caatinga, ou solo com grande exposição. Ainda com relação ao dia 14 de setembro de 2008 se percebe nitidamente, ao se ampliar as áreas sob influência de nuvens, valores superiores a 50 %, e algo que chama bastante a atenção qual seja uma acentuada diminuição do albedo nas áreas sombreadas por essas nuvens, o que revela valores inferiores a 5%. É oportuno registrar que nessas áreas incide apenas radiação solar difusa, e que ao se computar o albedo foi considerada a radiação solar global, portanto, com valor bem superior ao que realmente incidiu e por essa razão o valor do albedo ficou tão baixo. As novas áreas irrigadas do PISG apresentaram valores do albedo em torno de 16% a 20%.

Os três alvos escolhidos para validação dos resultados no PISG demonstram que os valores do α foram em média - no plantio de coco, arroz e vegetação nativa respectivamente - 19%, 18% e 20% para o ano de 2008 e de 21%, 19% e 18% para o ano de 2013. Estes resultados concordam com Borges et al. (2011), que encontraram valores de albedo no intervalo de 10% a 20% em áreas agrícolas irrigadas, bem como de 20 a 30% em solo

exposto. Silva et al. (2011) também encontraram para solos sem cobertura vegetal albedo maiores que 28% e para cultivos irrigados valores do albedo entre 15% e 20%. Oguntunde et al. (2006), pesquisando o efeito da umidade da superfície do solo sobre alterações nos valores de albedos, constataram albedos de 0,28 - 0,29 para solos descobertos e em condições de baixa umidade. No geral, os valores de α correspondentes às áreas agrícolas apresentaram variação em torno de 15 a 20% em todos os alvos em estudo. As áreas com cultivo de frutíferas, em Petrolina (SILVA et al., 2005), mostraram valores de α praticamente constantes, em torno de 15%. Estes valores estão em consonância com o valor do albedo estimado em campos com alta cobertura vegetativa derivados dos sensores TM – Landsat 5 e ETM+ – Landsat 7, que de acordo com Tasumi (2003) variam entre 15 e 25%.

Entre as imagens TM e OLI o que se revelou foi uma diferença sistemática entre os valores do albedo, sendo que aqueles obtidos com o OLI se mostraram superior aos gerados com o TM – Landsat 5. Há pelo menos duas explicações para essas diferenças: uma estaria relacionada ao fato de as imagens OLI (16 bits) possuírem resolução radiométrica substancialmente superior ao TM (8 bits); e, outra, de ordem ambiental, já que nos anos de 2012 e 2013 ocorreram chuvas bem abaixo das normais climatológicas, que caracterizaram esses anos como anos de secas de grande abrangência e intensidade, afetando inclusive as áreas irrigadas, vez que os produtores tiveram de racionar as irrigações em virtude da queda do volume de água do açude de São Gonçalo.

Na Figura 4.3 estão plotados os gráficos que representam a relação entre a temperatura e albedo em três pontos selecionados no PISG: área de coqueiro, arrozeiro e vegetação nativa. Observa-se que quanto menor o albedo maior é o valor da temperatura. Os mencionados gráficos demonstram que o albedo é diretamente proporcional à energia retida e inversamente proporcional à temperatura. Chama a atenção os valores da T_s obtidas com o Landsat 8, que se mostraram bem superior àquelas obtidas com o TM – Landsat 5.

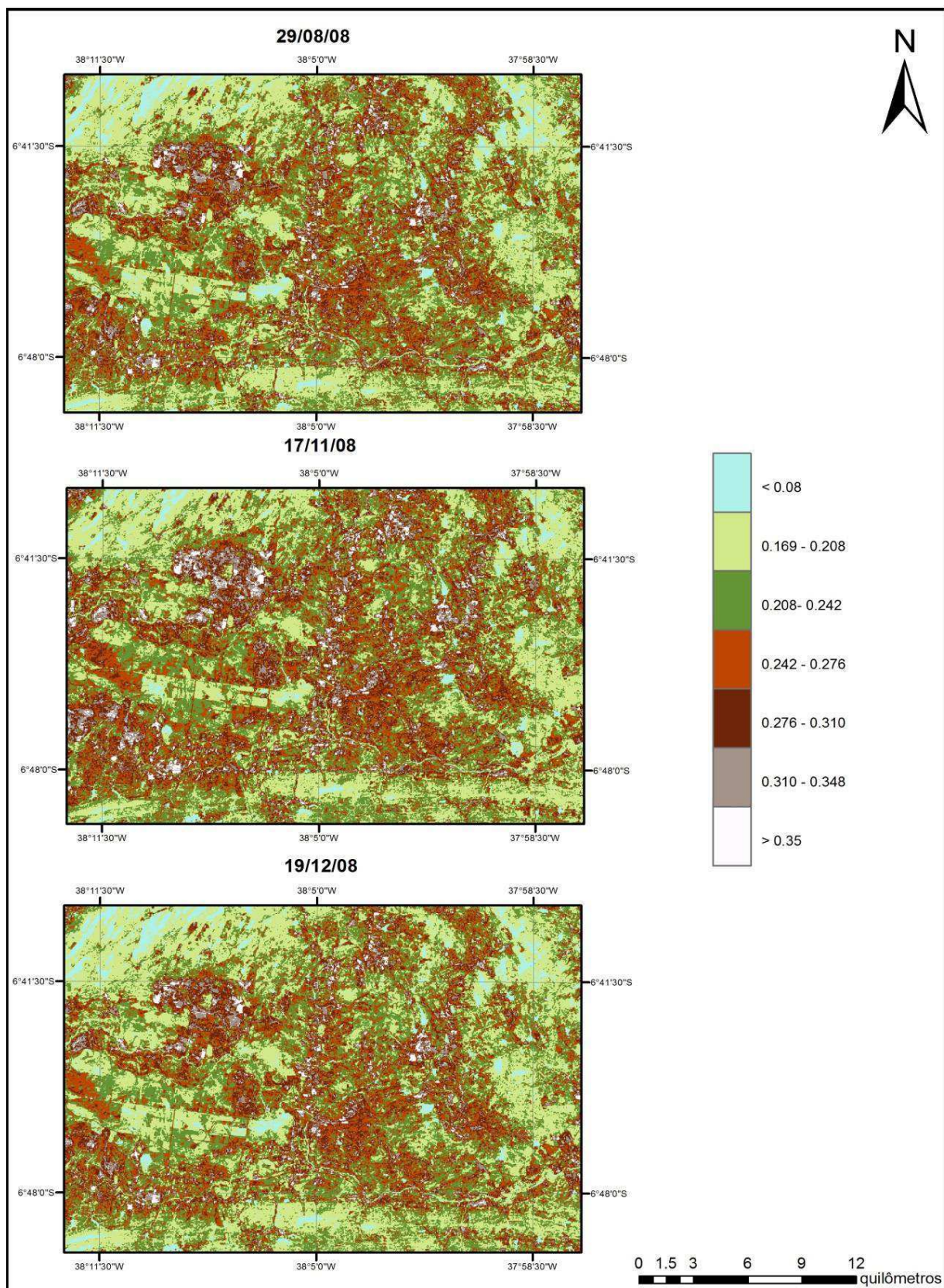


Figura 4.1 – Mapas temáticos do albedo da superfície obtidos dos produtos Landsat 5 no PISG referentes aos dias selecionados para a pesquisa em 2008

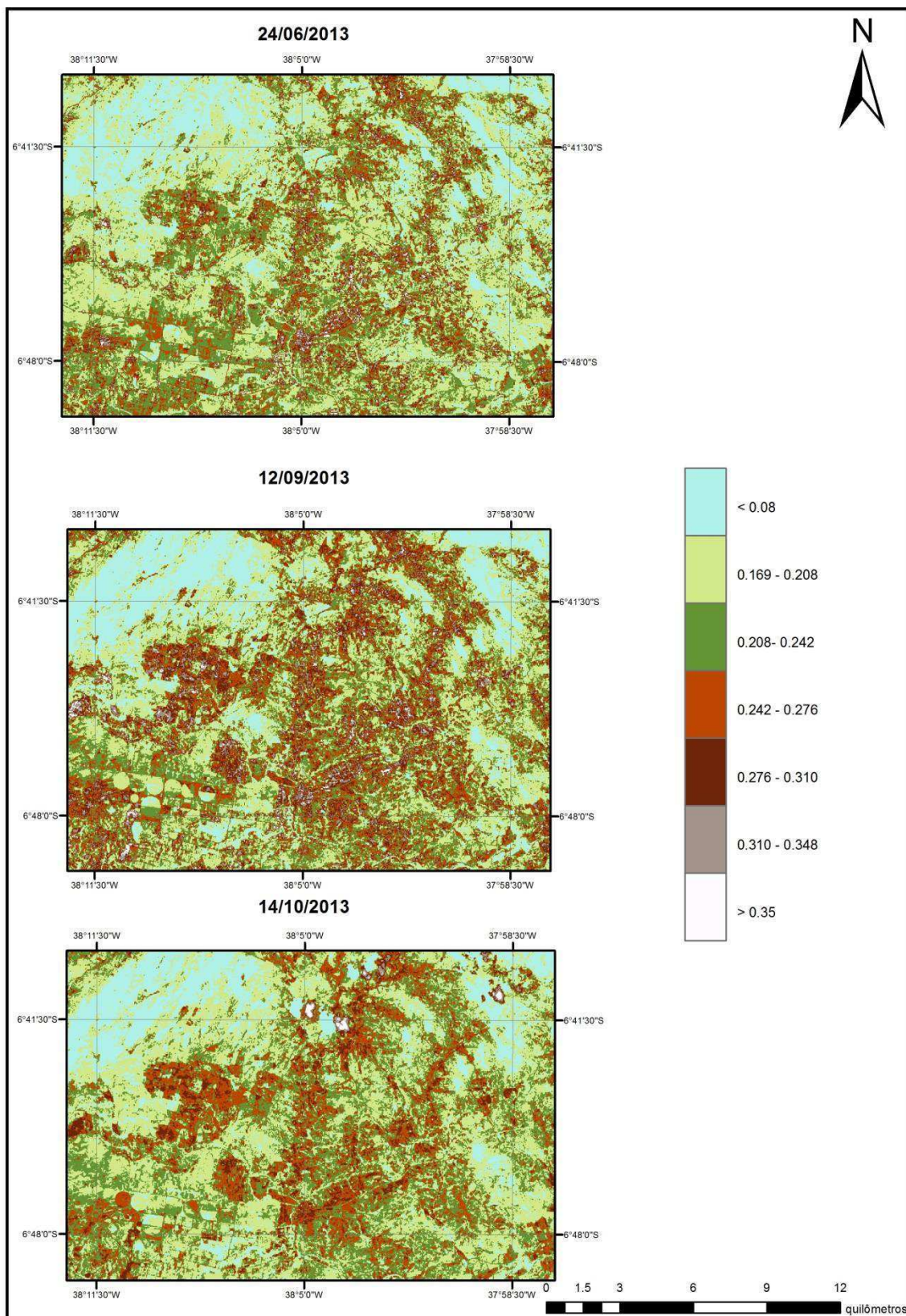


Figura 4.2 – Mapas temáticos do albedo da superfície obtidos dos produtos Landsat 8 no PISG referentes aos dias selecionados para a pesquisa em 2013

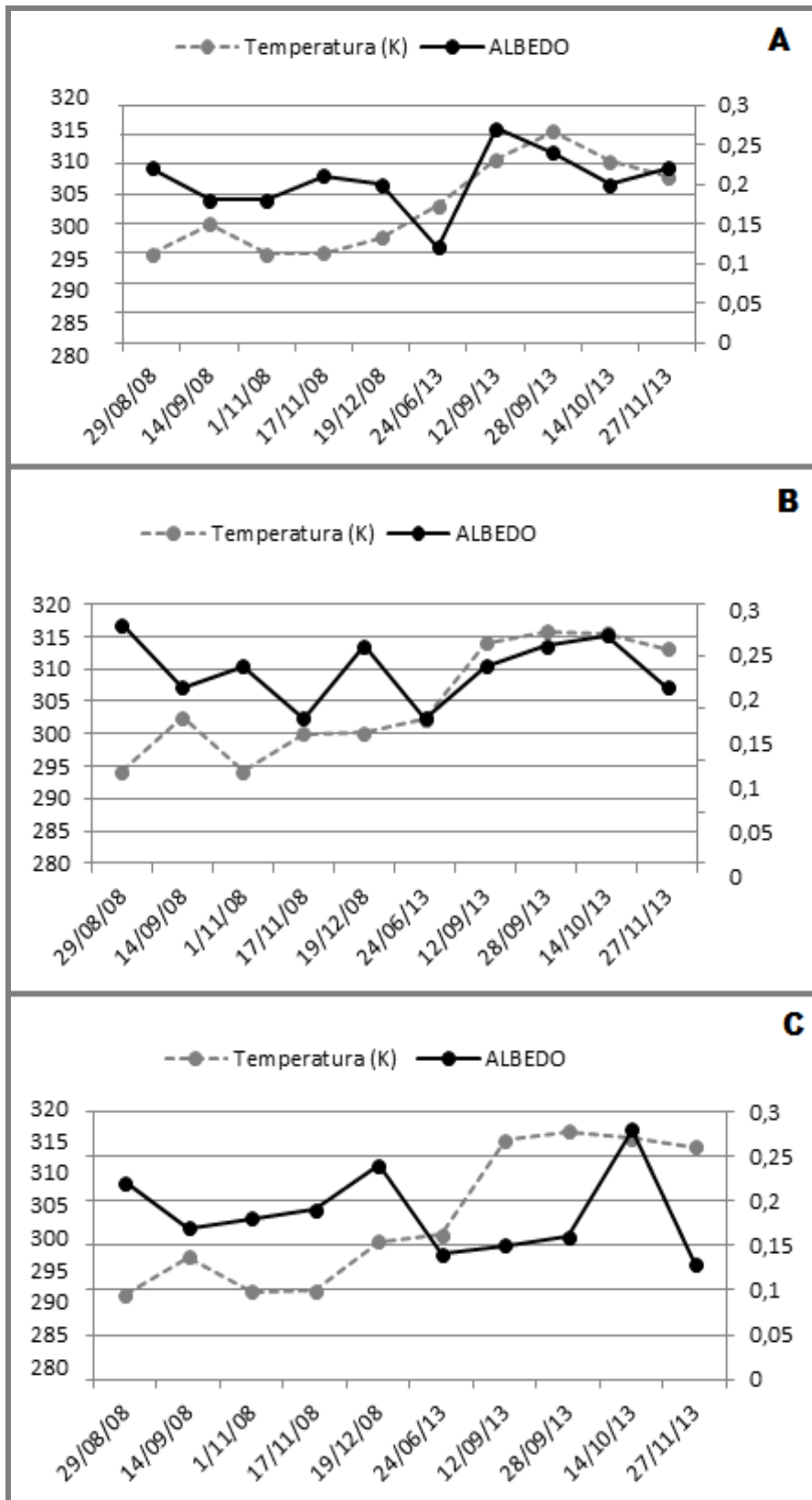


Figura 4.3 - Comportamento do albedo de superfície e a temperatura de superfície referente aos dias selecionados para pesquisa: A) coqueiro; B) arrozeiro; C) vegetação nativa.

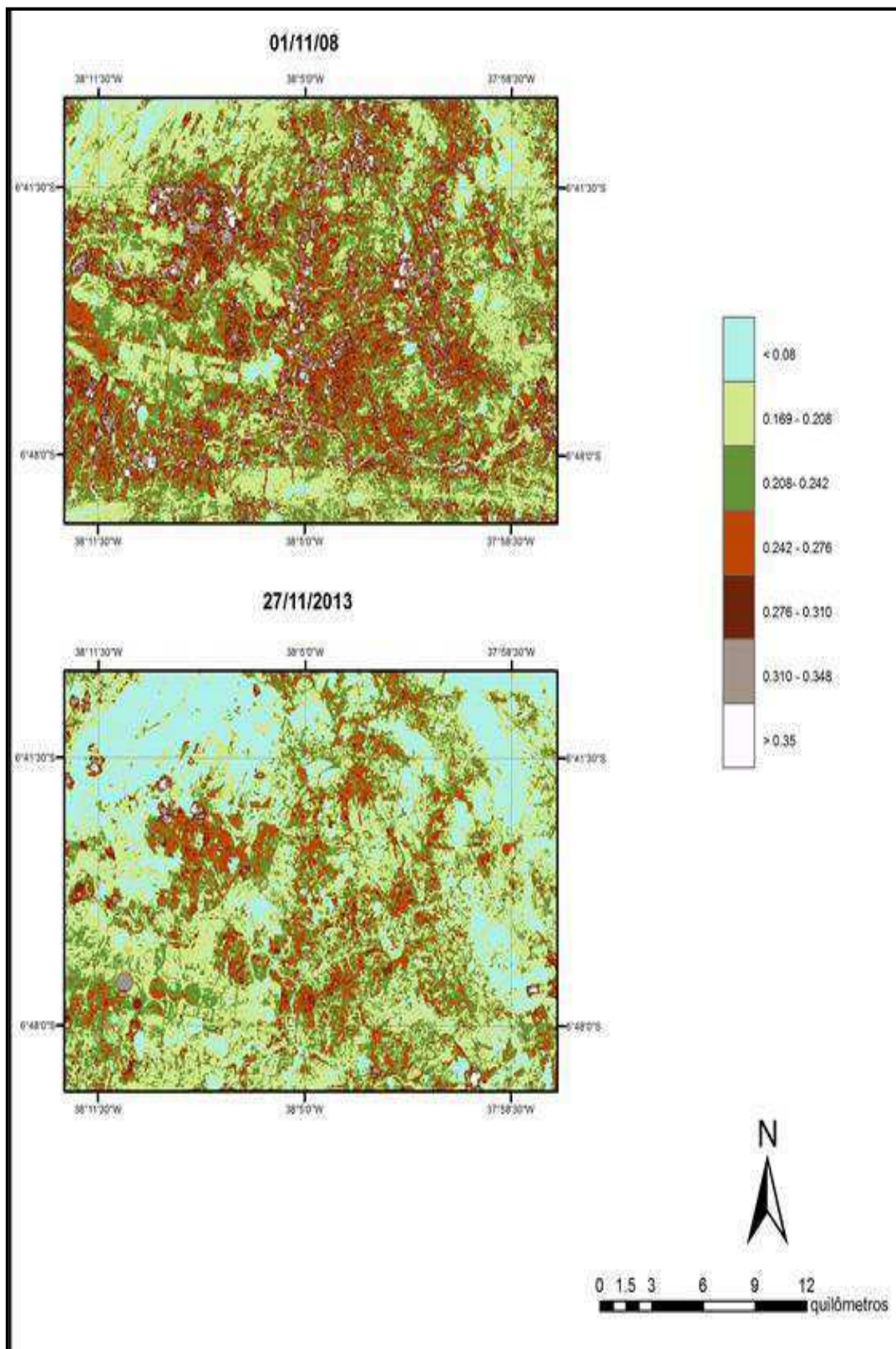


Figura 4.4 – Mapas temáticos do albedo da superfície obtidos dos produtos Landsat 5 e Landsat 8 no PISG nos anos de 2008 e 2013.

4.1.2 - Mapas temáticos da temperatura da superfície

A temperatura da superfície - T_s , vem sendo alvo de estudos em todo o globo, particularmente em decorrência das preocupações relativas ao aquecimento global e suas causas mais prováveis, queima de combustíveis fósseis, queimadas e mudanças no uso do solo (ARRAES et al., 2012; Oliveira et al., 2013). Na Figura 4.4 estão representados os mapas da T_s obtidas com o TM – Landsat 5, para as imagens do ano de 2008. Observa-se que as áreas agrícolas irrigadas e corpos d'água apresentaram os menores valores T_s . Em alguns dias há marcante presença de nuvens (dia 14/09/2008, por exemplo) e que proporciona valores inferiores a 280 K, ou seja, 17 °C. Ao se analisar o recorte como um todo pode-se ver as áreas relativas aos cursos de água e a influência da topografia afeta a T_s . O mesmo pode-se afirmar com relação aos mapas do ano de 2013 (Figura 4.5). A presença de pivôs centrais fica destada em todas as imagens, exceto na de 24 de junho de 2013. Nessas imagens do sensor IRTS tem grande destaque as áreas de altas altitudes na porção nordeste do recorte, bem como no limite inferior mais à esquerda do mesmo. Nessas áreas, e nas irrigadas também foram registrados os menores valores da T_s . As análises dos mapas de 2008 e 2013 possibilitam ver nítida diferença nos padrões de T_s e que os valores da T_s de 2013 são visivelmente maiores aos coletados pelo TM em 2008. Esse problema tem sido abordado em publicações bem recentes (BLACKETT, 2014) e o USGS já adotou uma providência recente que consiste em subtrair da radiância das bandas 10 e 11, 0,29 e 0,52 $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$, respectivamente. Com isso as temperaturas se aproximariam mais dos valores que estariam sendo registrados em superfície. Em áreas de vegetação nativa, a T_s ficou entre 25 e 32 °C, enquanto que nas áreas de solo com maior exposição T_s se mostrou superior a 35 °C e, no leito do açude de São Gonçalo, a T_s variou de 20 a 23°C. Esses valores corroboram os resultados obtidos por Santos e Silva et al. (2010), que encontraram valores de T_s para áreas com cultivo de bananeiras na ordem de 28°C, enquanto nas áreas de solo exposto os valores encontrados foram de 39°C e para vegetação nativa na ordem de 29°C.

As Figuras 4.4 e 4.5 demonstram que as temperaturas em locais montanhosos são em média 6°C mais baixo que a média de locais com o mesmo tipo de cobertura, isso acontece por causa dos fatores térmico e hídrico, por que nessas áreas há maior conteúdo de umidade no solo diminuindo a temperatura do ar. Em amarelo estão representadas as temperaturas das regiões com maiores altitudes, as quais registraram valores em torno de 21°C no ano de 2008. Já no ano de 2013 as mesmas áreas estão representadas pela cor roxa (Figura 4.5) e as temperaturas ficaram em torno de 45°C.

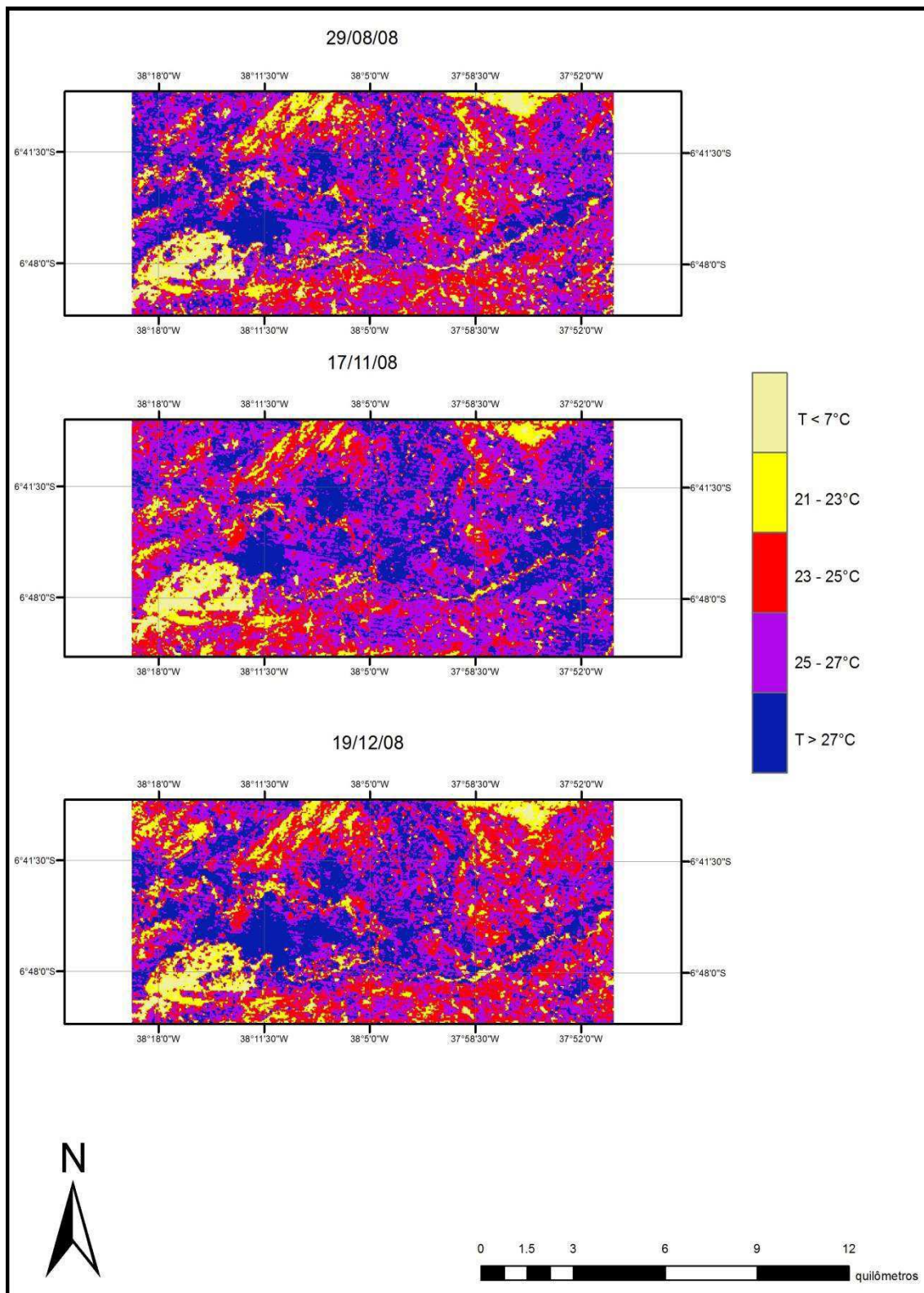


Figura 4.5 – Mapas temáticos da temperatura da superfície obtidos com o TM - Landsat 5 no PISG referentes aos dias selecionados para a pesquisa em 2008

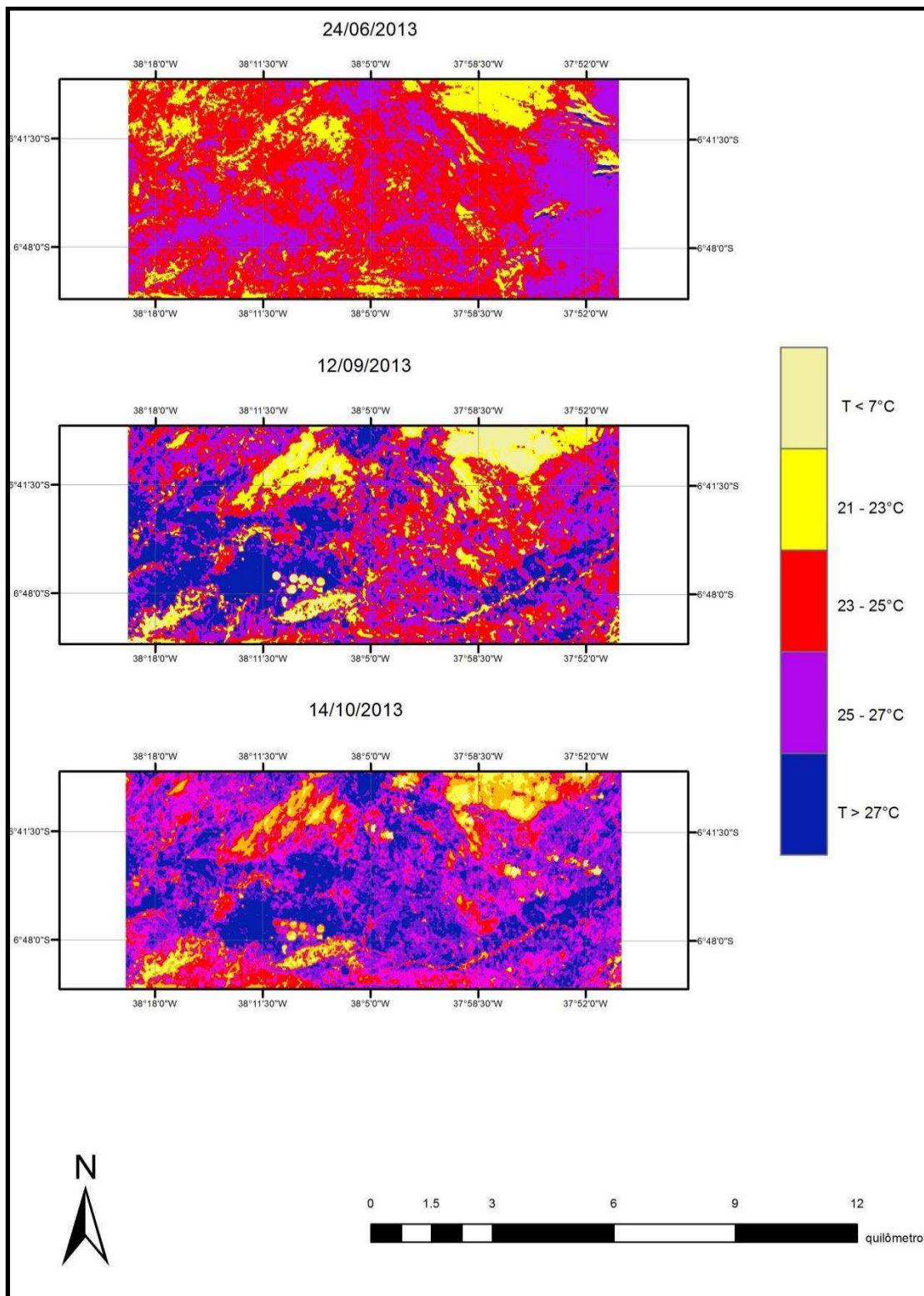


Figura 4.6 – Mapas temáticos da temperatura da superfície obtidos com o OLI/TIRS Landsat 8 no PISG referentes aos dias seleccionados para a pesquisa em 2013

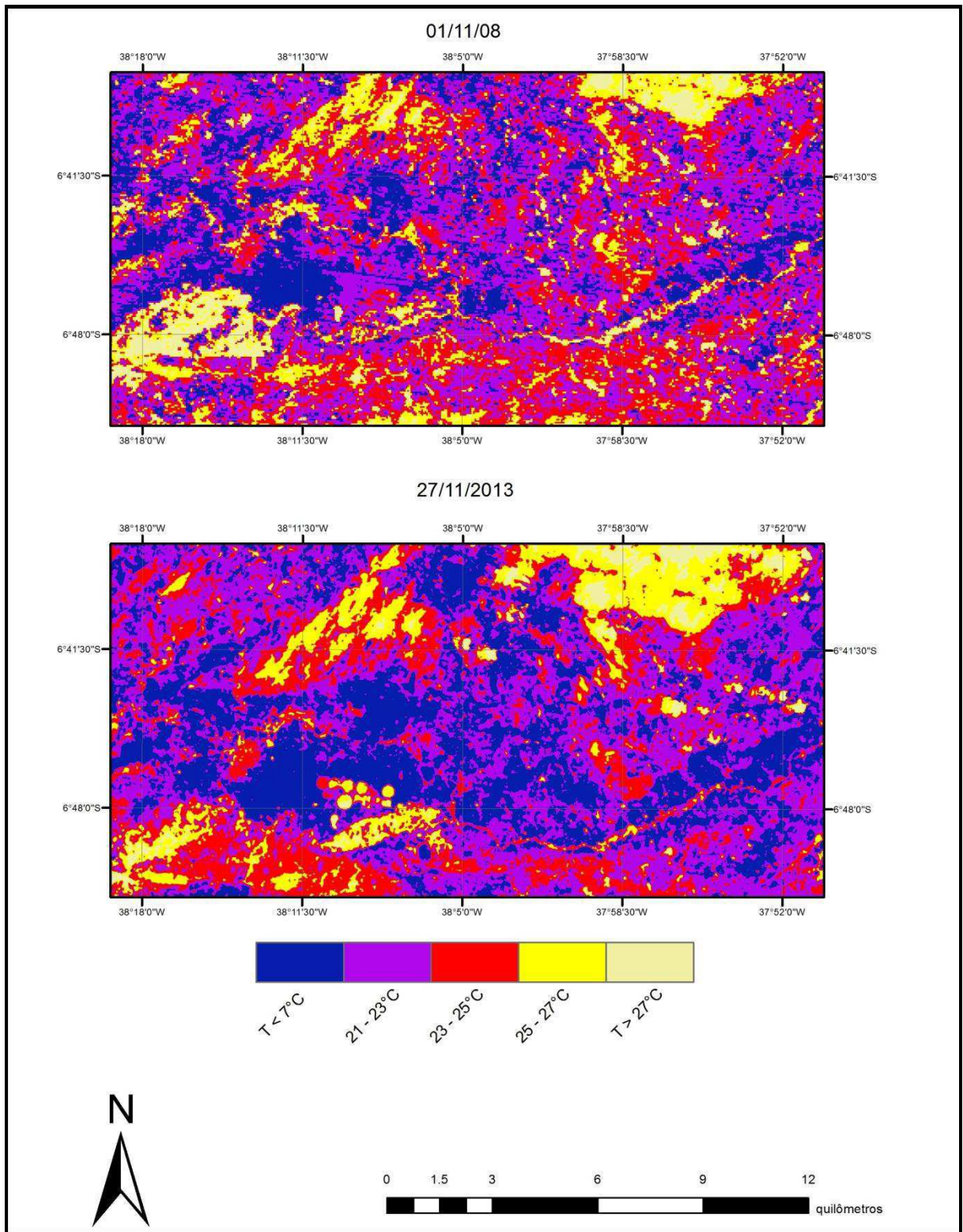


Figura 4.7 – Mapas temáticos da temperatura de superfície obtidos dos produtos Landsat 5 e Landsat 8 no PISG nos anos de 2008 e 2013.

4.1.3 - Mapas temáticos do índice de vegetação

Os índices de vegetação, dentre outras funções, ressaltam o comportamento espectral da vegetação em relação ao solo e outros alvos da superfície terrestre (MOREIRA, 2005). O IVDN foi utilizado para se avaliar a dinâmica da vegetação na bacia do Alto Piranhas, como também em três alvos distintos (coqueiro, arrozeiro e área de vegetação nativa) do Perímetro Irrigado de São Gonçalo – PISG. Esse índice é um indicador da biomassa e varia de 0 a 1. No entanto, assume valores negativos em pixels localizados em corpos de água, bem como associados à presença de nuvens. Valores entre 0 e 0,2 ocorrem em regiões de solo com grande exposição, ou mesmo desprovido de vegetação, que por essa razão afetam substancialmente os valores desse índice. Na medida em que aumenta, o IVDN indica presença cada vez maior de vegetação. Esse índice é muito susceptível às chuvas, particularmente no semiárido brasileiro. Na Figura 4.8 procurou-se correlacionar o IVDN com a precipitação nos três alvos mencionados. De um modo geral, há uma boa relação entre as duas variáveis, com menor coeficiente de determinação na área de vegetação nativa, como era de se esperar.

Nas Figuras 4.10 e 4.11 estão representados os mapas de IVDN obtidos pelo TM no ano de 2008 e OLI em 2013, respectivamente. Tais mapas foram selecionados com o objetivo de comparar a extensão das áreas agrícolas do PISG I e II, e o comportamento do IVDN nas áreas serranas. Observa-se que entre os anos de 2008 e 2013 as áreas irrigadas duplicaram suas extensões, o que representa uma pressão muito maior sobre os recursos hídricos localmente. Nos três alvos selecionados para estudo - coqueiro/banana, arroz e vegetação nativa - o IVDN ficou na ordem de 0,61, 0,31 e 0,58, respectivamente, o que se percebe mais nitidamente quando se ampliar cada uma das imagens representadas na figura 4.12.

Na estação chuvosa e nos primeiros meses que se sucedem à mesma, os valores do IVDN se apresentam substancialmente superiores aos registrados na estação seca do ano. A vegetação verde tem naturalmente apresentado maiores valores de IVDN, em função da alta absorção da radiação eletromagnética no intervalo de comprimento de onda do vermelho pela clorofila, nas folhas verdes, combinada com alta reflectância na faixa do infravermelho próximo, em virtude da presença da clorofila e turgidez das folhas sadias.

Ferreira et al. (2012) encontraram valores de IVDN superiores a 0,40, para regiões com marcante presença de fruticultura às margens do rio São Francisco, em Petrolina-PE. Ainda naquela região em área de caatinga no período de estiagem aqueles autores obtiveram valores do IVDN inferiores a 0,30 e no período chuvoso esses valores oscilaram entre 0,40-

0,50. Em algumas situações estes resultados se assemelham com os encontrados nesta pesquisa. Lillesand et al. (2007) e Nicácio (2008) encontraram valores de IVDN entre 0,48 e 0,82 para regiões com marcante presença de fruticultura às margens do rio São Francisco, em Petrolina. Folhes (2007) observou em perímetros irrigados de fruticultura valores de IVDN que oscilaram entre 0,7 e 0,9.

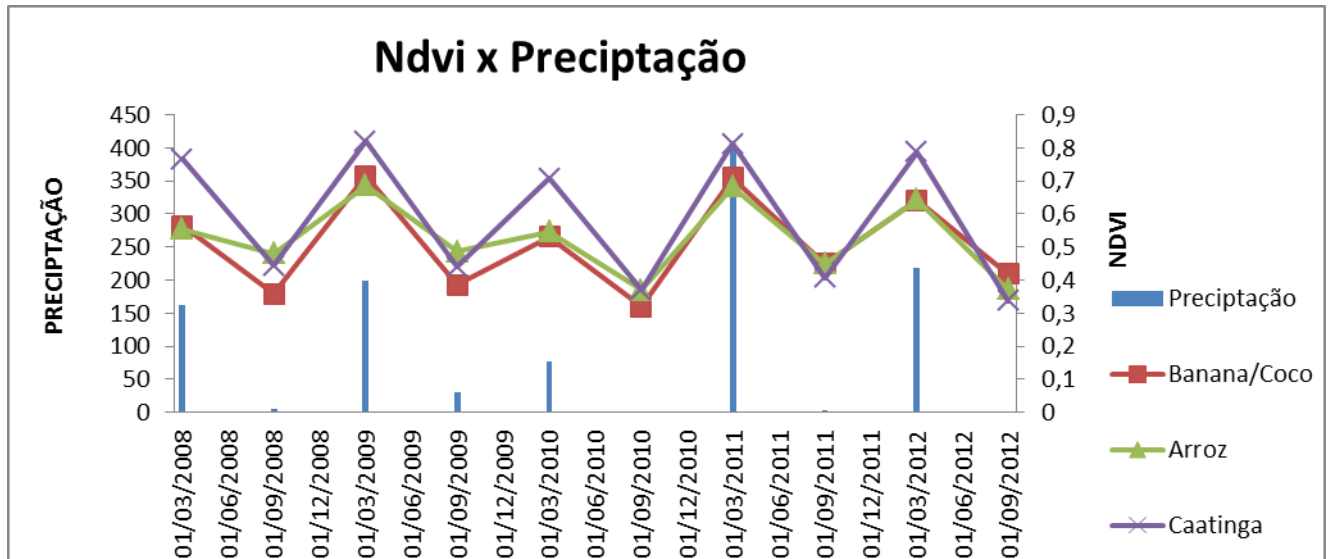


Figura 4.8 - Comportamento do Índice de vegetação e as precipitações referentes aos períodos seco e chuvoso da região estudada em três tipos de alvo do PISG

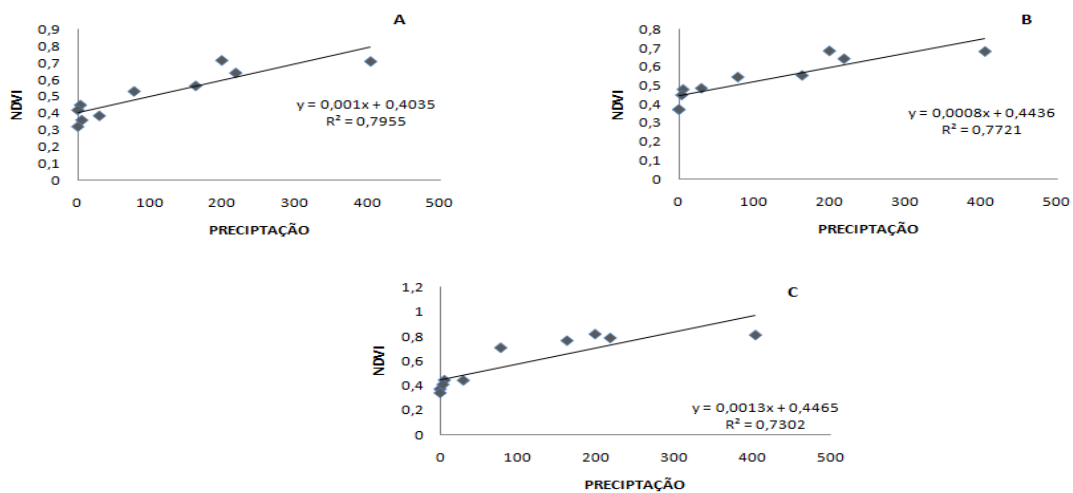


Figura 4.9 - Correlação do IVDN e precipitações referentes aos períodos secos e chuvosos da região estudada em cultivo de coqueiro (A), arrozeiro (B) e vegetação nativa (C)

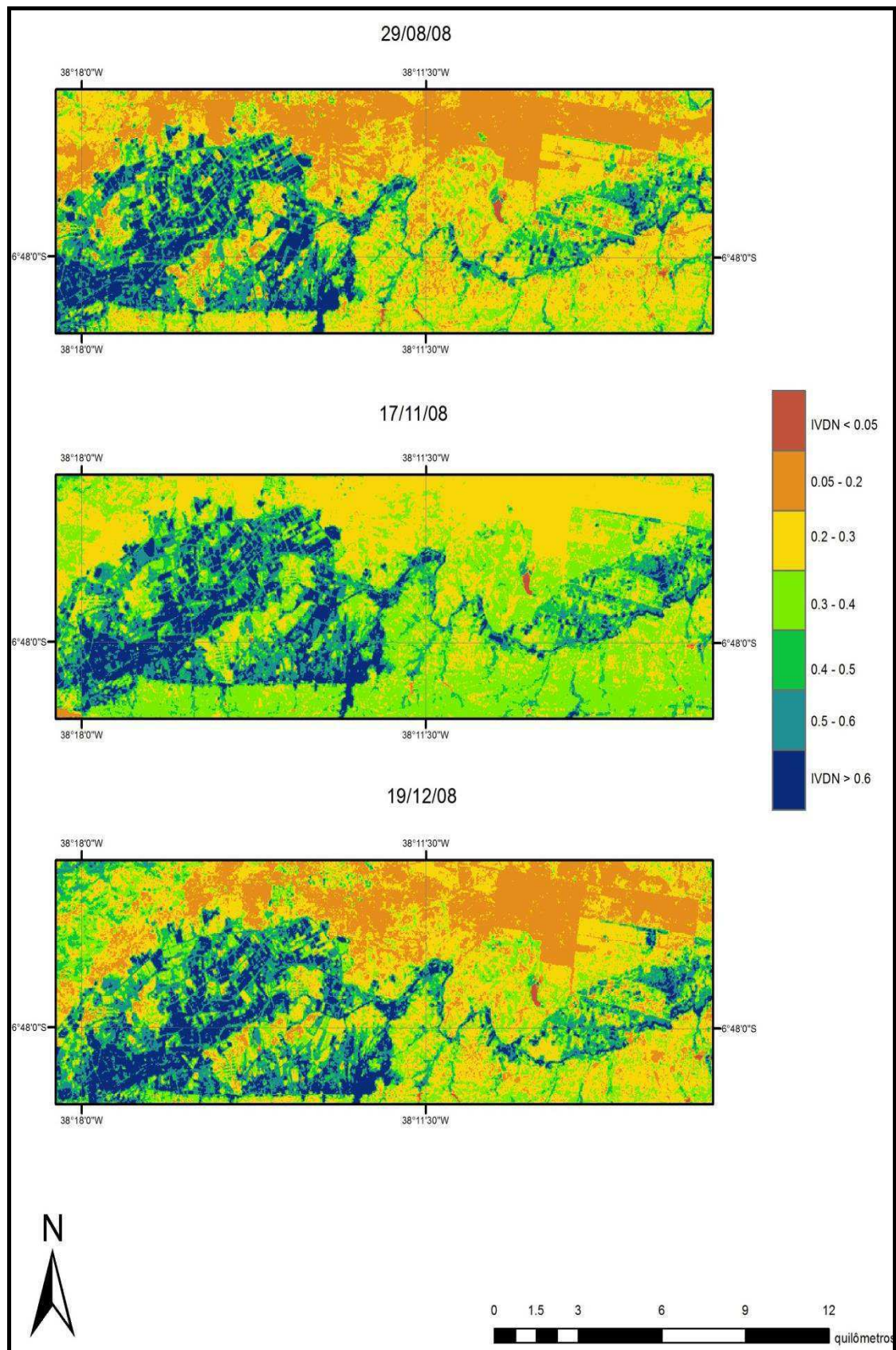


Figura 4.10 - Mapas temáticos do IVDN obtidos com o Landsat 5 referentes aos dias seleccionados para a pesquisa no ano de 2008

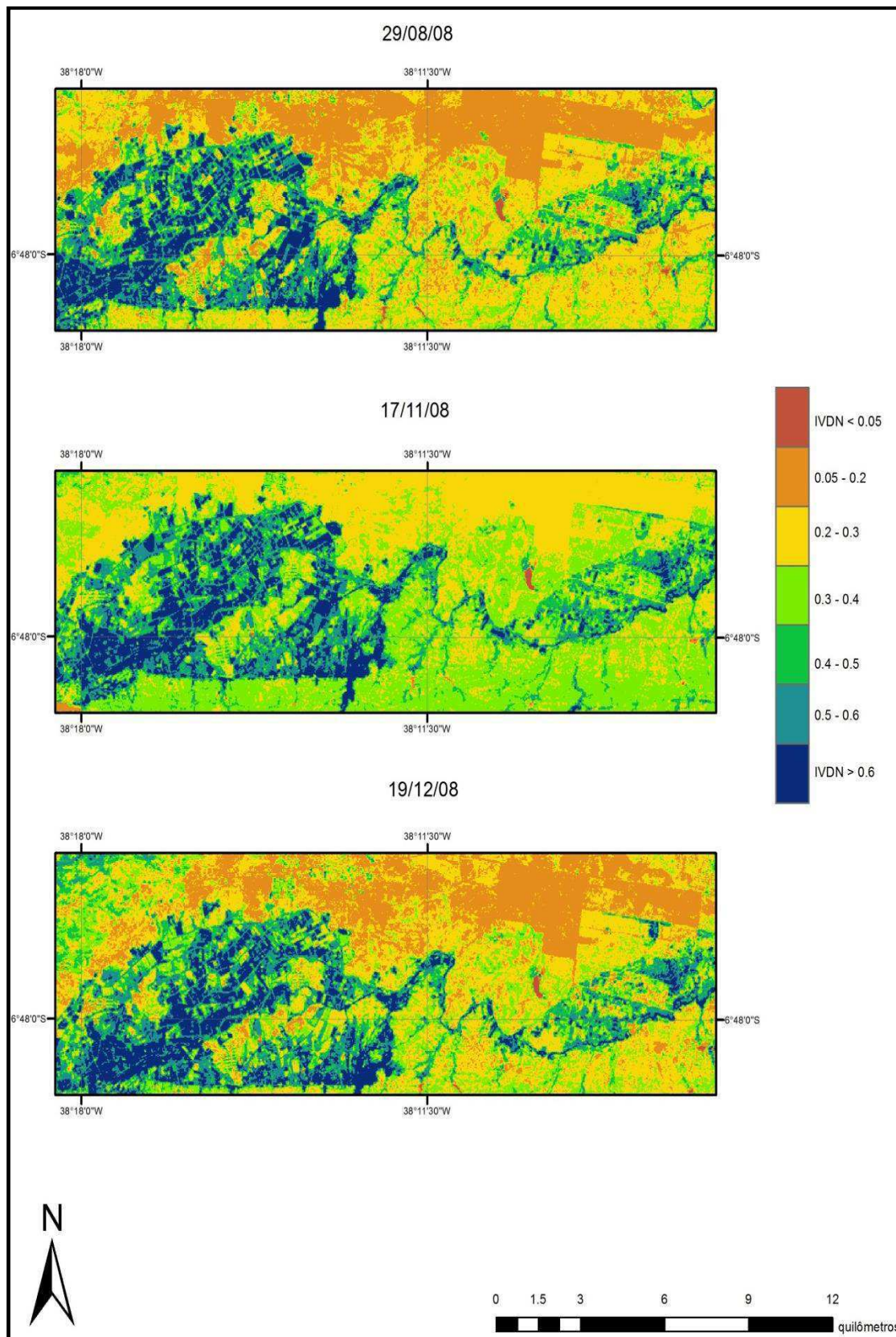


Figura 4.11 - Mapas temáticos do IVDN obtidos com o Landsat 8 referentes aos dias selecionados para a pesquisa no ano de 2013

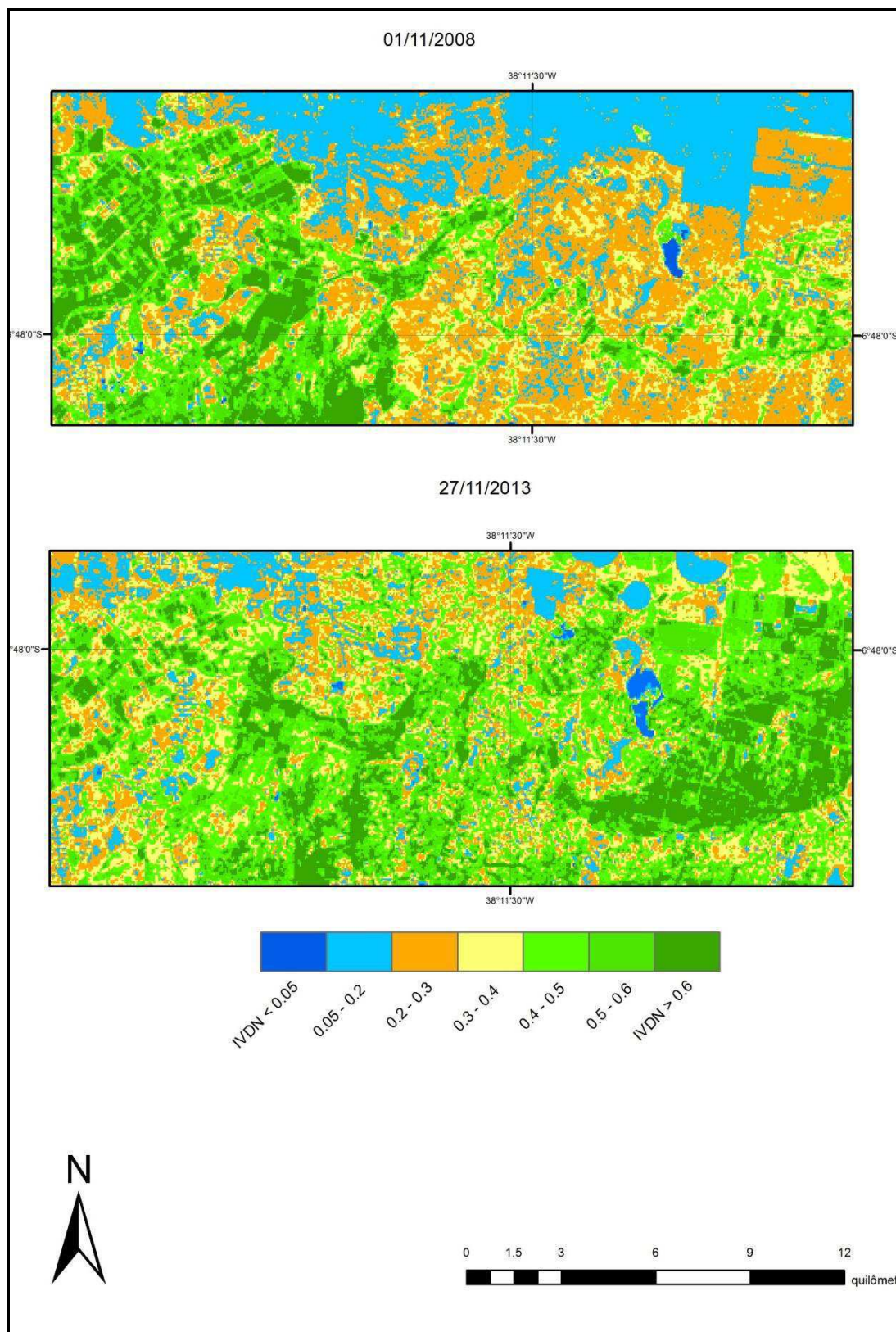


Figura 4.12 - Mapas temáticos do IVDN obtidos com o Landsat 5 e Landsat 8 no PISG nos anos de 2008 e 20135

4.1.4 - Mapas temáticos do saldo de radiação à superfície

O saldo de radiação – R_n constitui um elemento chave no cômputo do balanço de energia e da evapotranspiração real – E_{Tr} , em virtude desta variável ser utilizada em diversas aplicações, incluindo monitoramento climático, previsão do tempo e em meteorologia agrícola. Para melhor análise do R_n de cada imagem apresentada, faz-se necessário relatar brevemente o comportamento de algumas variáveis que influenciam sua determinação, tais como: albedo da superfície – α , temperatura da superfície – T_s , radiação solar incidente – $R_{S,inc}$, radiação de onda longa emitida pela atmosfera – $R_{ol,atm}$ e transmissividade atmosférica – τ_{sw} . O albedo, de um modo geral, apresentaram valores com variação entre 15 a 30% na da bacia do Alto Piranhas, como já discutido na seção 4.1.1.

Os valores instantâneos da τ_{sw} , T_{ar} , $R_{ol,atm}$, $R_{s,ins}$ medidos e/ou estimados, e as diferenças absoluta e relativa entre as mesmas estão apresentadas na Tabela 4.1. Os valores da τ_{sw} variaram de 0,723 a 0,760, devido, principalmente, a pressão real de vapor – e_a , pois esta é utilizada na obtenção da água precipitável – W , que por sua vez é utilizada no cálculo de τ_{sw} . Este comportamento se deve também ao fato de que os valores instantâneos da pressão atmosférica – P_a e do cosseno do ângulo zenital solar – $\cos Z$ terem baixa amplitude entre as datas estudadas. A respeito da pressão atmosférica, os valores medidos localmente nas datas analisadas ficaram muito próximo ao valor médio, qual seja, 98,6 kPA.

De acordo com a expressão empregada na pesquisa, a $R_{ol,atm}$ foi obtida em função da τ_{sw} , utilizada no cálculo da emissividade da atmosfera, e da temperatura do ar – T_{ar} , ambas apresentadas na Tabela 4.1. Como τ_{sw} pouco variou, pode-se concluir que $R_{ol,atm}$ ficou a depender do valor da T_{ar} . Dessa forma, observa-se que os maior valores de $R_{ol,atm}$ foram obtidos em 19 de dezembro de 2008 ($358,6 \text{ W m}^{-2}$) e 27 de novembro 2013 ($382,2 \text{ W m}^{-2}$) (período de temperaturas do ar mais elevadas), enquanto que os menores valores ocorreram em 12 de setembro de 2013 ($354,0 \text{ W m}^{-2}$) e 17 de novembro de 2008 ($343,0 \text{ W m}^{-2}$) (dias com temperaturas do ar mais amenas). Os valores da $R_{s,ins}$ (W m^{-2}) foram obtidos segundo procedimentos de Allen et al. (2007), utilizados em diversos artigos no Brasil e exterior (SILVA et al., 2011; ARRAES et al., 2012; SANTOS et al., 2013). Para os dias selecionados para a pesquisa, os valores de $R_{s,ins}$ se situaram entre $730,3$ e $955,5 \text{ W m}^{-2}$. Já a $R_{s,24h}$, empregada no cômputo do saldo diário e que foi medida por radiômetro da estação automática do INMET nas dependências do PISG, registraram valores entre $240,7 \text{ W m}^{-2}$ (24 de junho de 2013) e $333,9 \text{ W m}^{-2}$ (19 de dezembro de 2008).

Tabela 4.1 – Datas das imagens do TM e OLI/TIRS, transmissividade atmosférica – τ_{oc} , temperatura do ar – T_{ar} (°C), pressão atmosférica – Pa (KPa), radiação de onda longa atmosférica - $R_{ol,atm}$ (Wm^{-2}), radiação solar instantânea incidente – $R_{s,inc}$ (Wm^{-2}) no momento da passagem do satélite e radiação solar global diária – $R_{s,24h}$ (Wm^{-2}) nos dias selecionados para a pesquisa

Data	τ_{oc}	T_{ar}	Pa	$R_{ol,atm}$	$R_{s,ins}$	R ($W m^{-2}$)
29/agos/2008	0,763	29,1	98,1	373,8	807,9	294,9
14/set/2008	0,744	29,2	98,9	377,0	891,1	292,5
1/nov/2008	0,745	29,5	98,7	365,8	915,5	317,1
17/nov/2008	0,743	28,6	98,3	343,0	908,2	318,1
19/dez/2008	0,722	29,6	93,4	358,6	873,1	333,9
24/jun/2013	0,753	26,9	98,9	357,8	730,3	357,8
12/set/2013	0,760	28,5	98,7	354,0	901,9	309,5
28/set/2013	0,753	30,0	98,9	373,2	927,6	314,6
14/out/2013	0,758	31,2	98,8	374,7	955,5	317,1
27/nov/2013	0,757	30,1	98,2	382,2	944,4	303,5

As imagens do R_n instantâneo (Wm^{-2}) estão representadas nas Figura 4.11 e 4.12, relativas aos satélites Landsat 5 e 8, respectivamente. Constata-se que o leito do açude apresentou os maiores valores de R_n em todas as imagens, com valores superiores a $700 W m^{-2}$ em todas as cenas estudadas (representadas pela cor branca). Nas áreas em marrom que correspondem, principalmente, às áreas de vegetação nativa, verifica-se que o R_n variou entre 550 e $800 W m^{-2}$. Já as áreas de solo exposto, representadas pela cor vermelho, apresentaram R_n entre 500 e $600 W m^{-2}$. Para áreas de solo exposto Santos e Silva (2010) encontraram valores na ordem de $577 W m^{-2}$ no município de Quixeré-CE. Nas áreas irrigadas, o R_n variou entre 600 e $780 W m^{-2}$, valores esses que corroboram com os obtidos em áreas com cultivo de bananeiras por Santos e Silva (2010), que encontraram valores de R_n na ordem de $667 W m^{-2}$. Borges et al. (2010), em campos de algodão irrigado, registraram valores de R_n entre 550 a $650 W m^{-2}$ durante o período de máximo desenvolvimento vegetativo, na sub-bacia do médio São Francisco, Bahia. Bezerra (2006) e Paiva (2005) encontraram valores próximos para o lago de Sobradinho na Bahia, ou seja, de $585 W m^{-2}$ para solo exposto e $662 W m^{-2}$ para corpos d'água e em torno de $600 W m^{-2}$ para superfícies vegetadas. Destaca-se nas figuras do R_n , além de pixels referentes a corpos de água e altos valores de R_n (cor

branco), as áreas correspondentes às sombras de nuvens, que apresentam albedo muito baixo e, por conseguinte, alto saldo de radiação. De um modo geral, constata-se uma diferença considerável entre os valores do Rn Landsat 5 e Landsat 8. Sistemáticamente, nas imagens de Rn obtidas com o OLI/IRTS os valores do saldo se mostraram substancialmente inferiores àqueles gerados com o TM. Como mencionada na análise da Ts, a sobre-estimativa desta variável provoca uma grande perda de radiação de onda longa, reduzindo, portanto, o saldo de radiação. Também foi constatado que os valores do albedo obtidos com o OLI se mostraram ligeiramente superiores aos obtidos com o TM, não obstante um problema de ordem ambiental que esteve ocorrendo simultaneamente: ocorrência de seca no ano de 2013, o que elevaria naturalmente os valores do albedo e temperatura. Esses aspectos podem ser mais bem ilustrados na Figura 4.13, que apresentam valores do albedo e saldo de radiação para cada um dos dias selecionados, em áreas de coqueiro, arrozeiro e vegetação nativa. De acordo com essa figura, os valores do Rn em 2013 são visivelmente inferiores aos de 2008, como já analisado acima. Os valores do albedo, no entanto, não evidenciam um possível aumento que estaria presente nos dados de 2013.

4.1.5 – Impacto da topografia no balanço radiativo na bacia do Alto Piranhas

Em áreas de topografia muito heterogênea, que resultam em pixels com inclinação e aspecto muito variados, a radiação solar incidente em cada pixel sofre grande variabilidade. Para ilustrar esse problema foi gerado para cada dia com imagens do Landsat 8, o mapa temático da radiação solar instantânea e em especial o do saldo com o modelo de elevação digital – MED. Na Figura 4.14 estão representados os mapas do saldo de radiação ($W m^{-2}$) para o dia 1 de novembro de 2008, segundo o SEBAL e METRIC, bem como o mapa da radiação solar instantânea ($W m^{-2}$). Como se depreende da inspeção dos mapas, os valores de Rn apresentam padrões semelhantes, mas os valores do METRIC são superiores aos do SEBAL. Isso se explica pelo fato do albedo METRIC ser visivelmente inferior aos obtidos com o SEBAL. Nas áreas serranas a variabilidade e magnitude do saldo e da radiação solar são muito intensas. Essa influência não se observa nas áreas dos PISG (PGSG I e PISG II), vez que a topografia do mesmo é muito regular e homogênea. Di Paci et al. (2008) analisaram a influência da topografia em áreas irrigadas e de vegetação nativa nas proximidades de Petrolina e essa influência em bacias hidrográficas é muito nítida, particularmente nos pixels que coincidem com os delimitadores da bacia. Considerando-se que o grande objetivo da pesquisa se concentra no volume de água destinado às irrigações, as análises dos diferentes componentes dos balanços radiativos, e em especial do balanço de energia, evapotranspiração

e produtividade primária, se concentrarão nas áreas dos perímetros irrigadas PISG I e PISG II, e suas imediações.

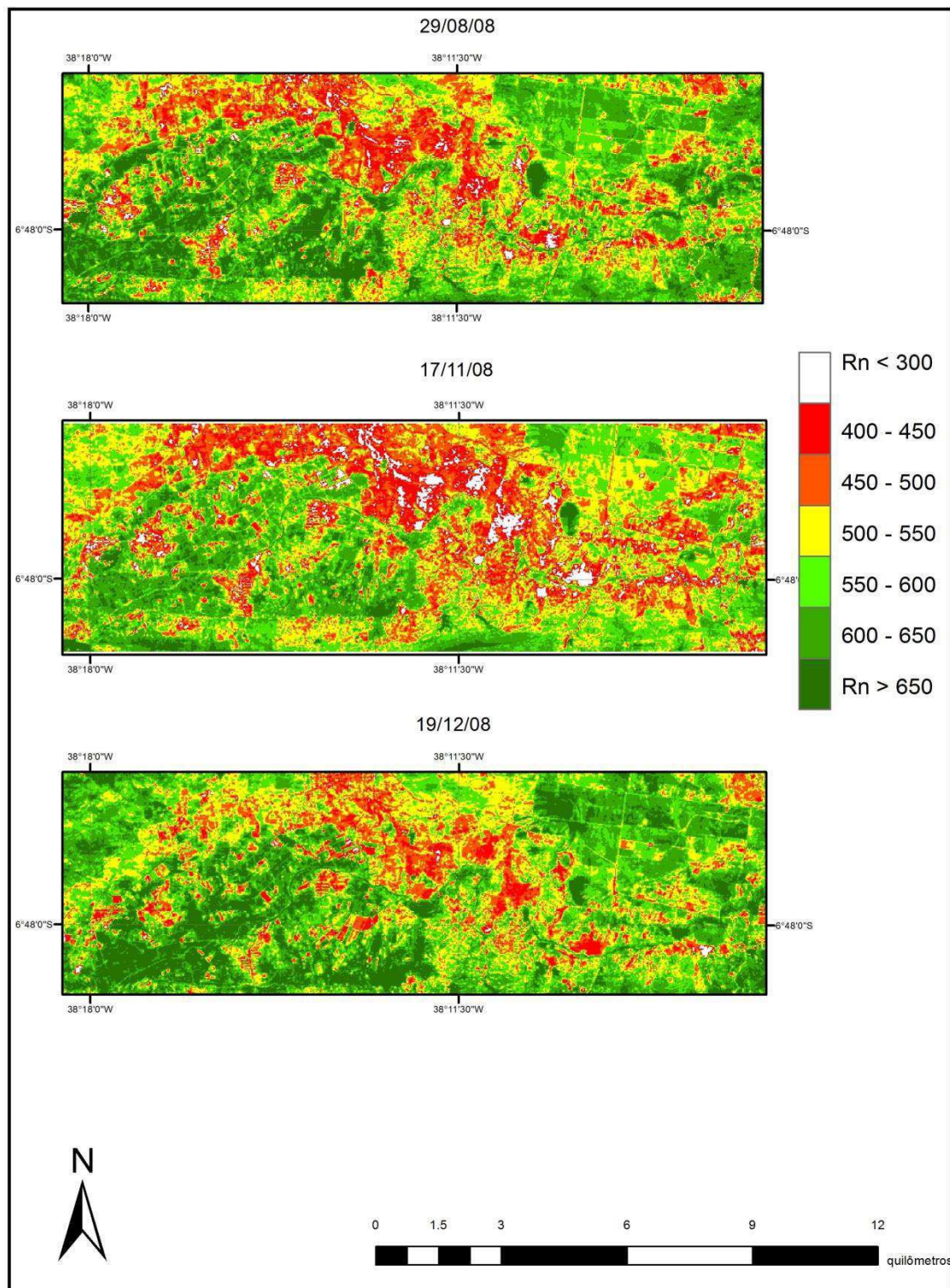


Figura 4.13 – Mapas temáticos do saldo de radiação (Wm^{-2}) à superfície, obtidos pelo TM - Landsat 5 nos dias selecionados para a pesquisa em 2008

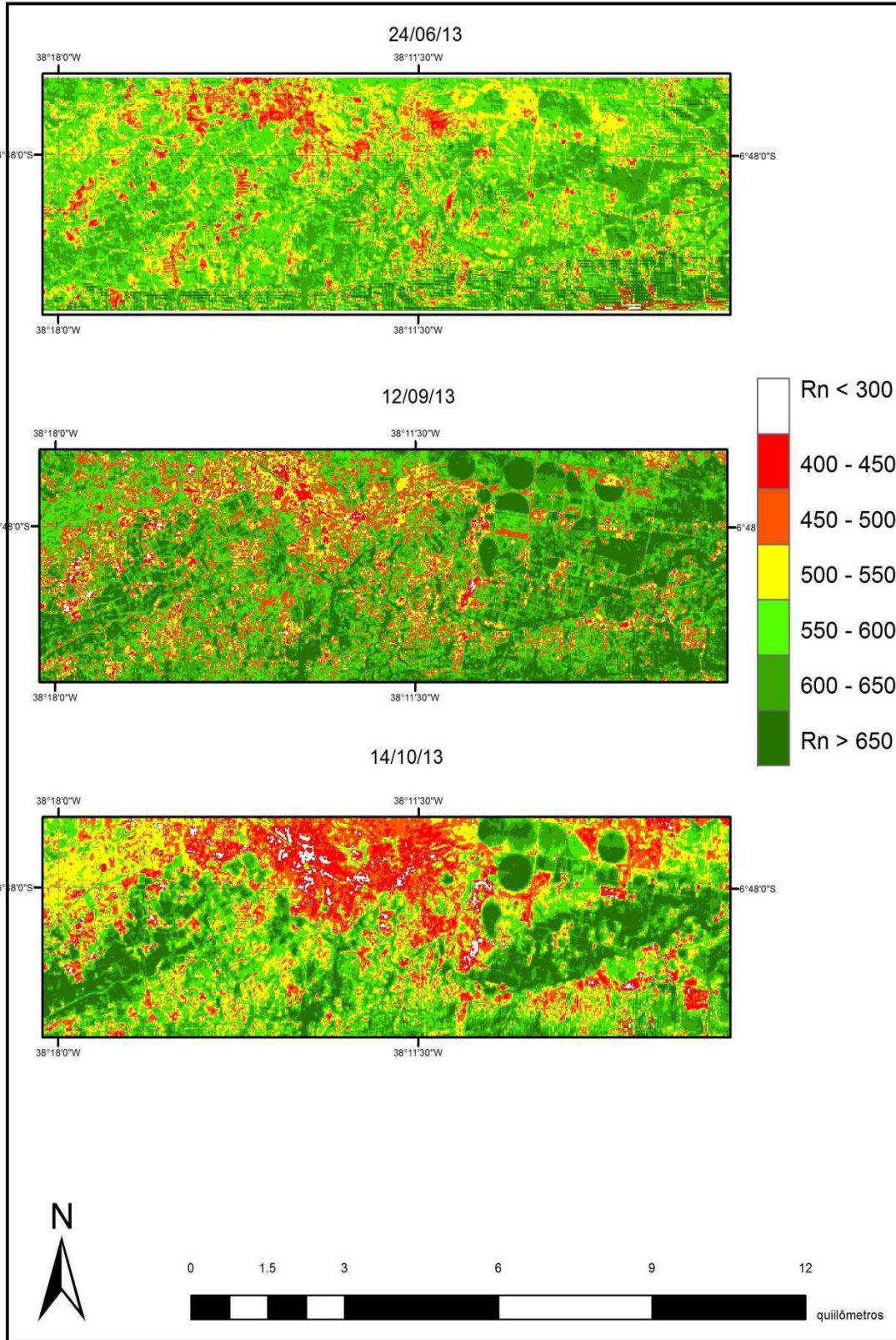


Figura 4.14 – Mapas temáticos do saldo de radiação à superfície ($W m^{-2}$) obtidos com o OLI/IRTS - Landsat 8 referentes aos dias selecionados para a pesquisa em 2013

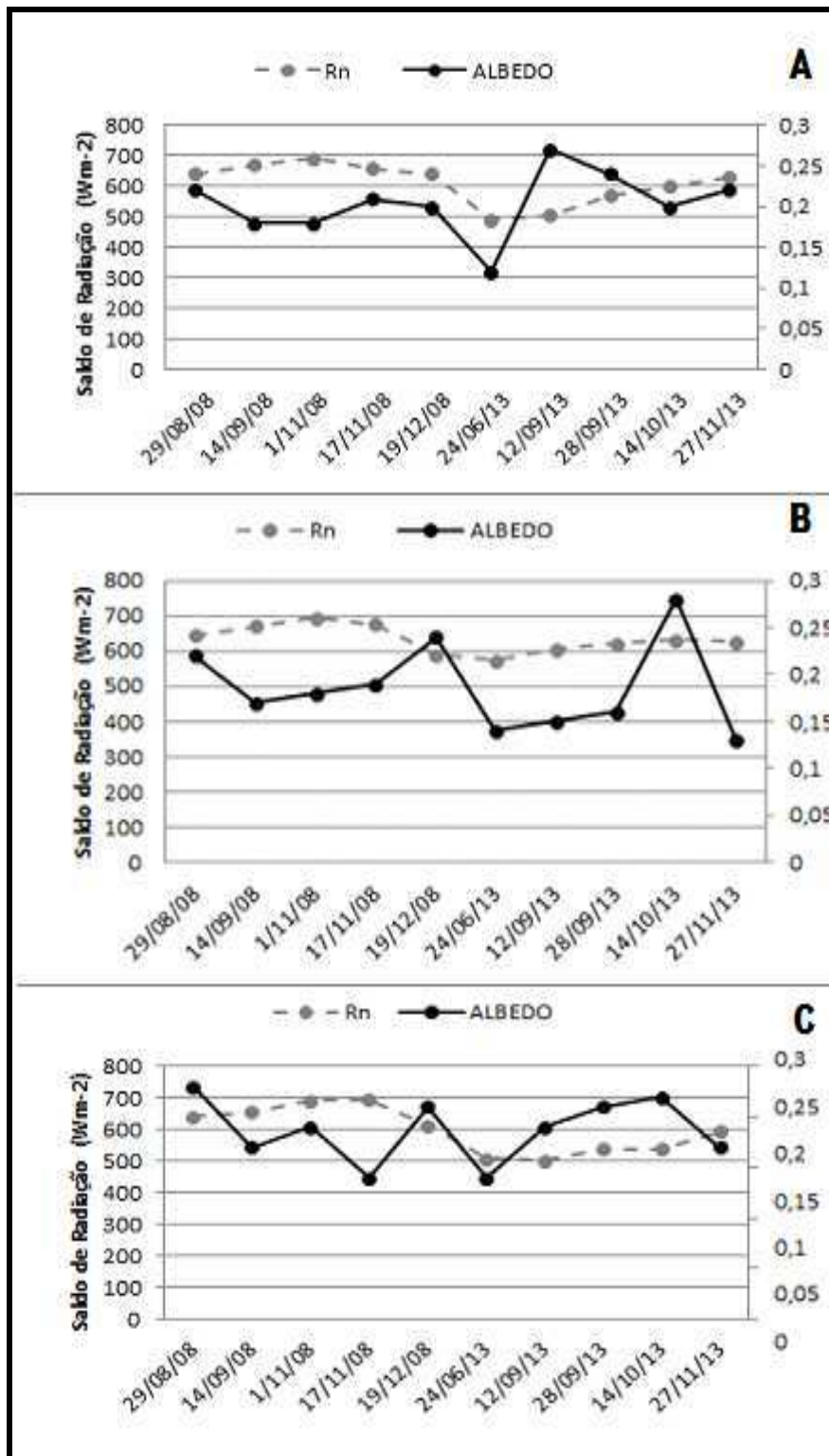


Figura 4.15 – Relação entre o albedo e o saldo de radiação à superfície, referentes aos dias selecionados para a pesquisa em áreas de A) coqueiro, B) arrozeiro e C) vegetação nativa.

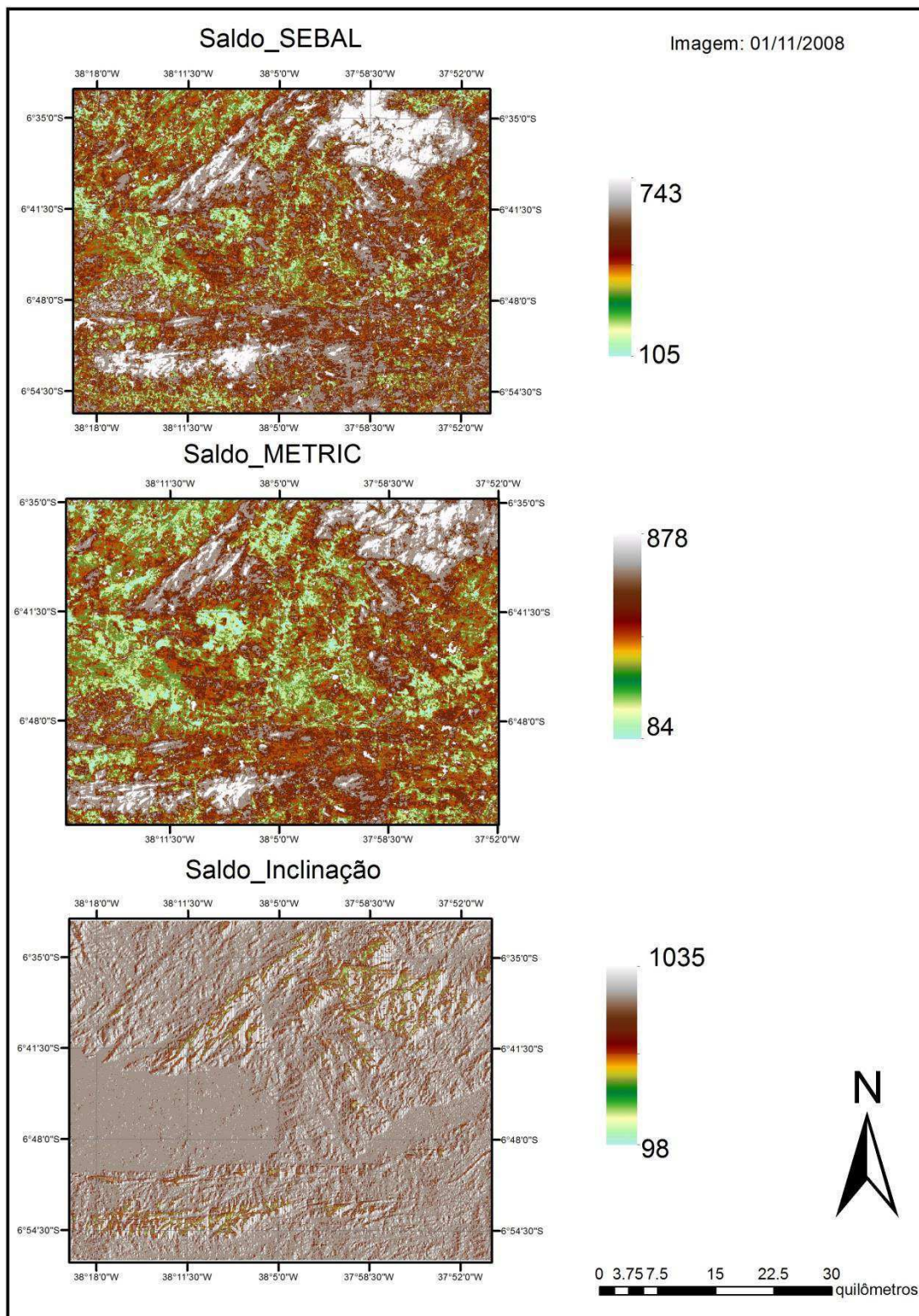


Figura 4.16 – Mapa do saldo de radiação ($W m^{-2}$) obtido pelo SEBAL e METRIC, e radiação solar instantânea ($W m^{-2}$) para o dia 1 de novembro de 2008

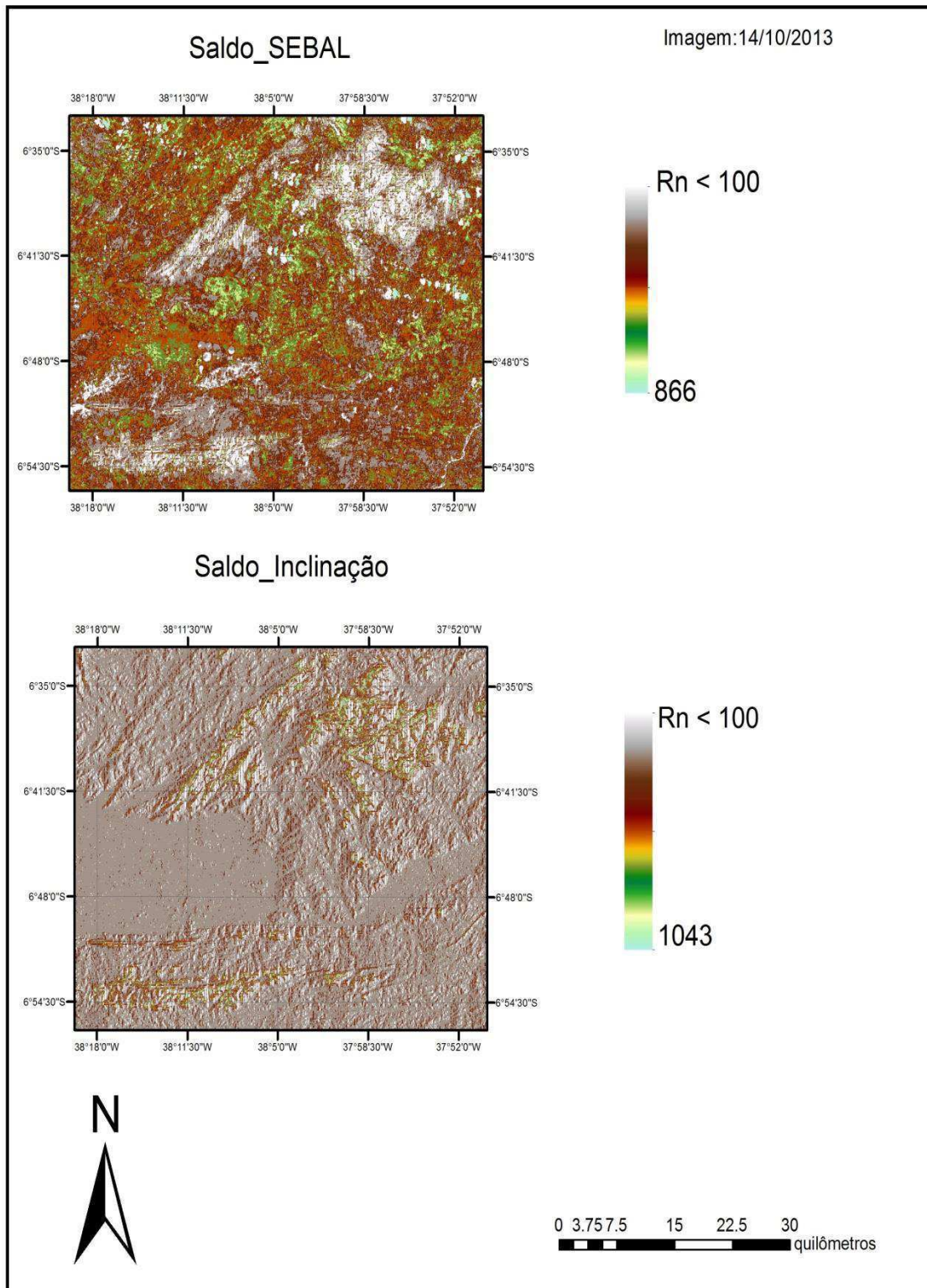


Figura 4.17 – Mapa do saldo de radiação (W m^{-2}) obtido pelo SEBAL com o OLI/TIRS – Landsat 8, e radiação solar instantânea (W m^{-2}) para o dia 27 de novembro de 2013

4.1.6 – Mapas temáticos da fração evaporativa

Os mapas temáticos da Fração Evaporativa - FE estão representados nas Figuras 4.16 e 4.17 para as cenas selecionadas para o estudo. Os mapas da FE foram empregados no cálculo da evapotranspiração real diária - ETr segundo o SEBAL, e também são usados como indicador do fator umidade no processo de cálculo da produtividade primária bruta – GPP (SILVA et al., 2012). As áreas irrigadas do PISG, e também outras áreas irrigadas do recorte estudado, evidenciam valores mais elevados da FE. Fica também constatado que nos meses da estação chuvosa local, ou nos meses da estação seca, em que ainda existe algum estoque de umidade no solo, os valores da FE são por vezes semelhantes aos das áreas irrigadas. Uma característica marcante da vegetação da caatinga é que mesma responde rapidamente às ocorrências de precipitações, mesmo fora da estação chuvosa, o que implica em alto FE após um evento chuvoso significativo. Teixeira et al. (2009b) verificaram no período chuvoso na região do Perímetro Irrigado Petrolina-Juazeiro que a FE na caatinga era semelhante à verificada em cultivos agrícolas.

Os valores menores da FE ($FE < 0,25$) estão representados na cor azul claro. Nos meses de novembro as áreas que correspondem ao PISG têm uma pequena variação nos valores da Fração Evaporativa que vai de 0,50 a 0,75 e em alguns pontos encontram-se valores superiores a 0,90. Os valores médios da FE obtidos foram de 0,86 à 0,90 em todas as áreas da bacia do Alto Piranhas.

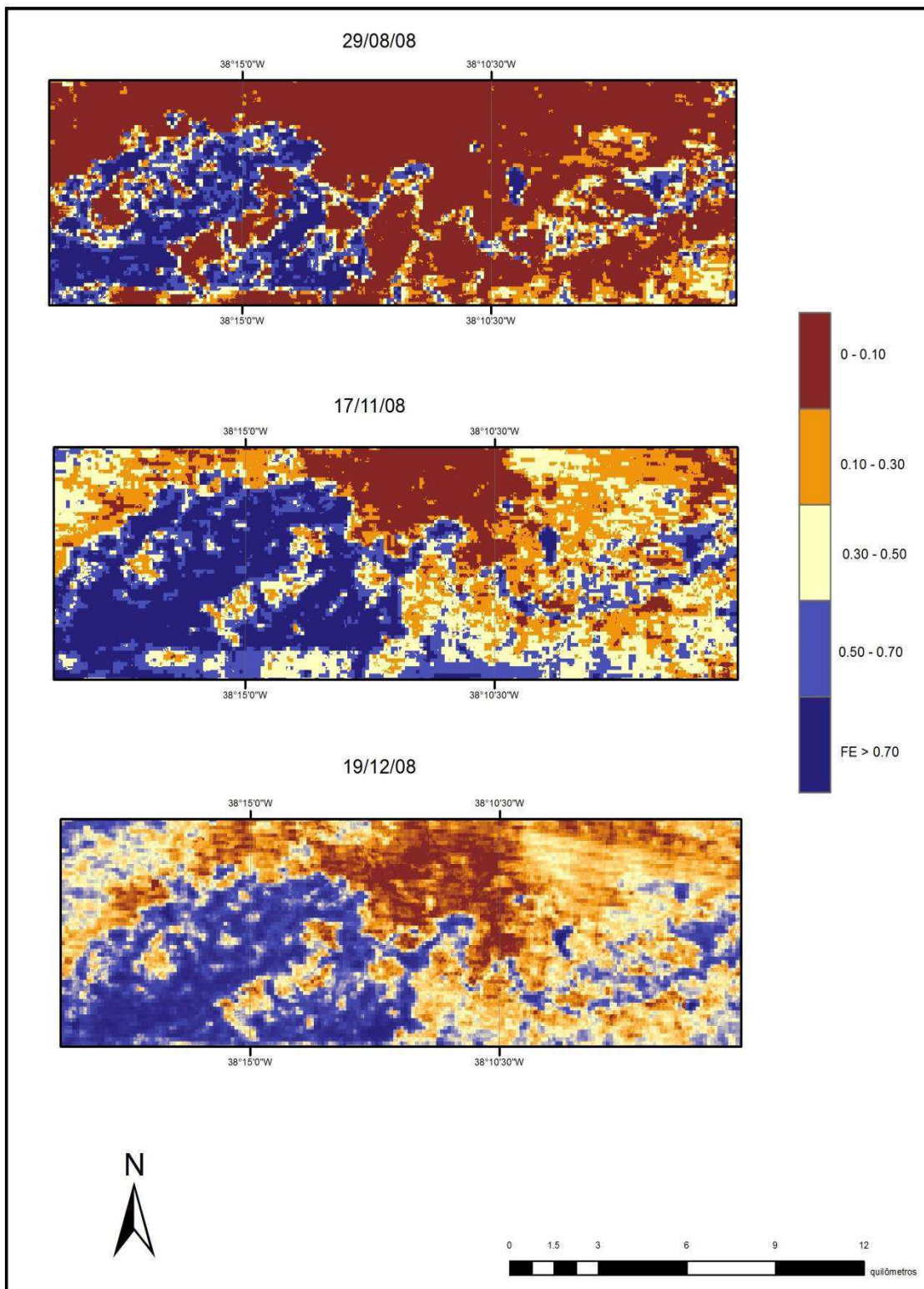


Figura 4.18 - Mapas temáticos da fração evaporativa obtidos com o Landsat 5 no PISG referentes aos dias selecionados para a pesquisa em 2008

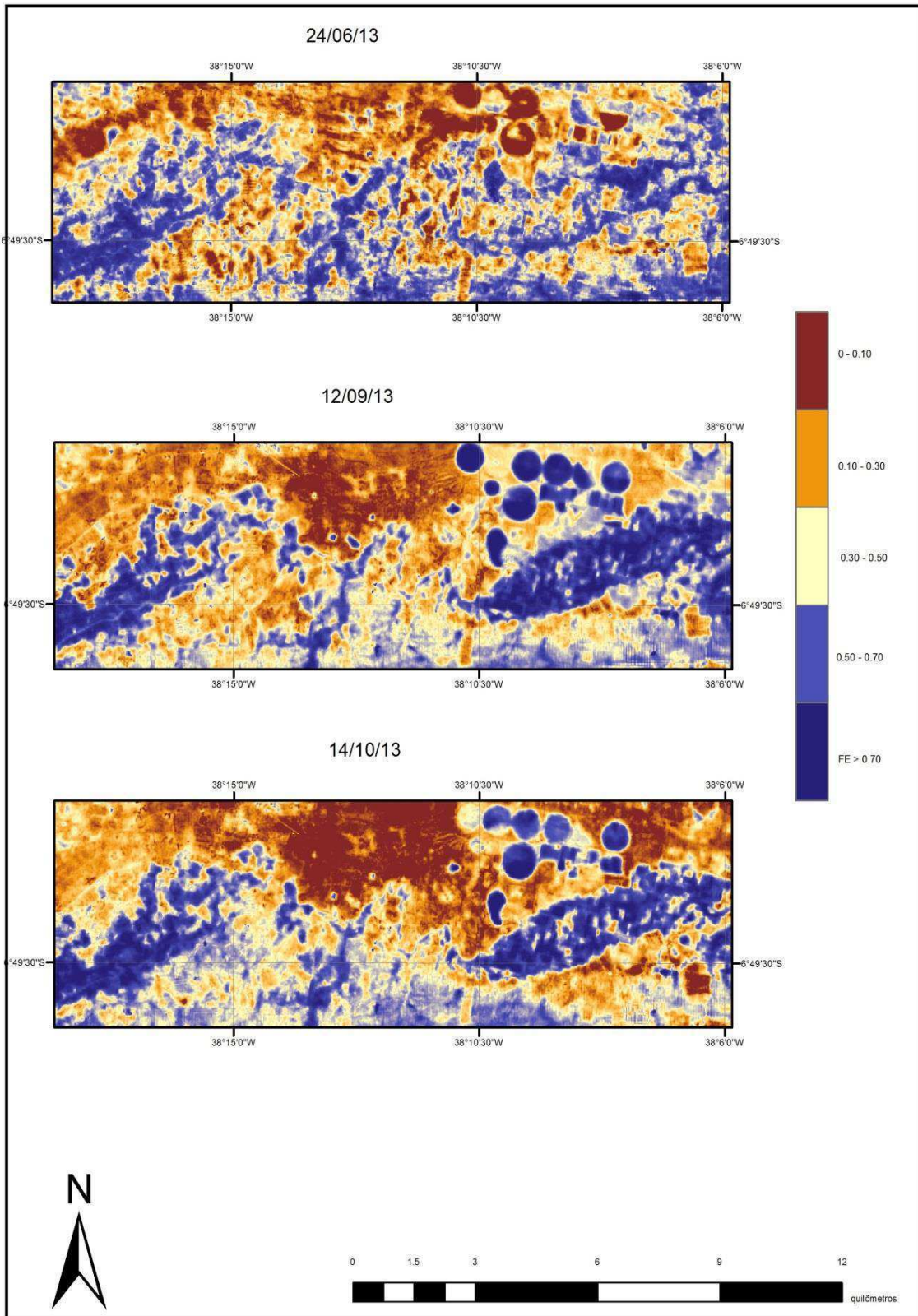


Figura 4.19 - Mapas temáticos da fração evaporativa obtidos com o Landsat 8 no PISG referentes aos dias seleccionados para a pesquisa em 2013

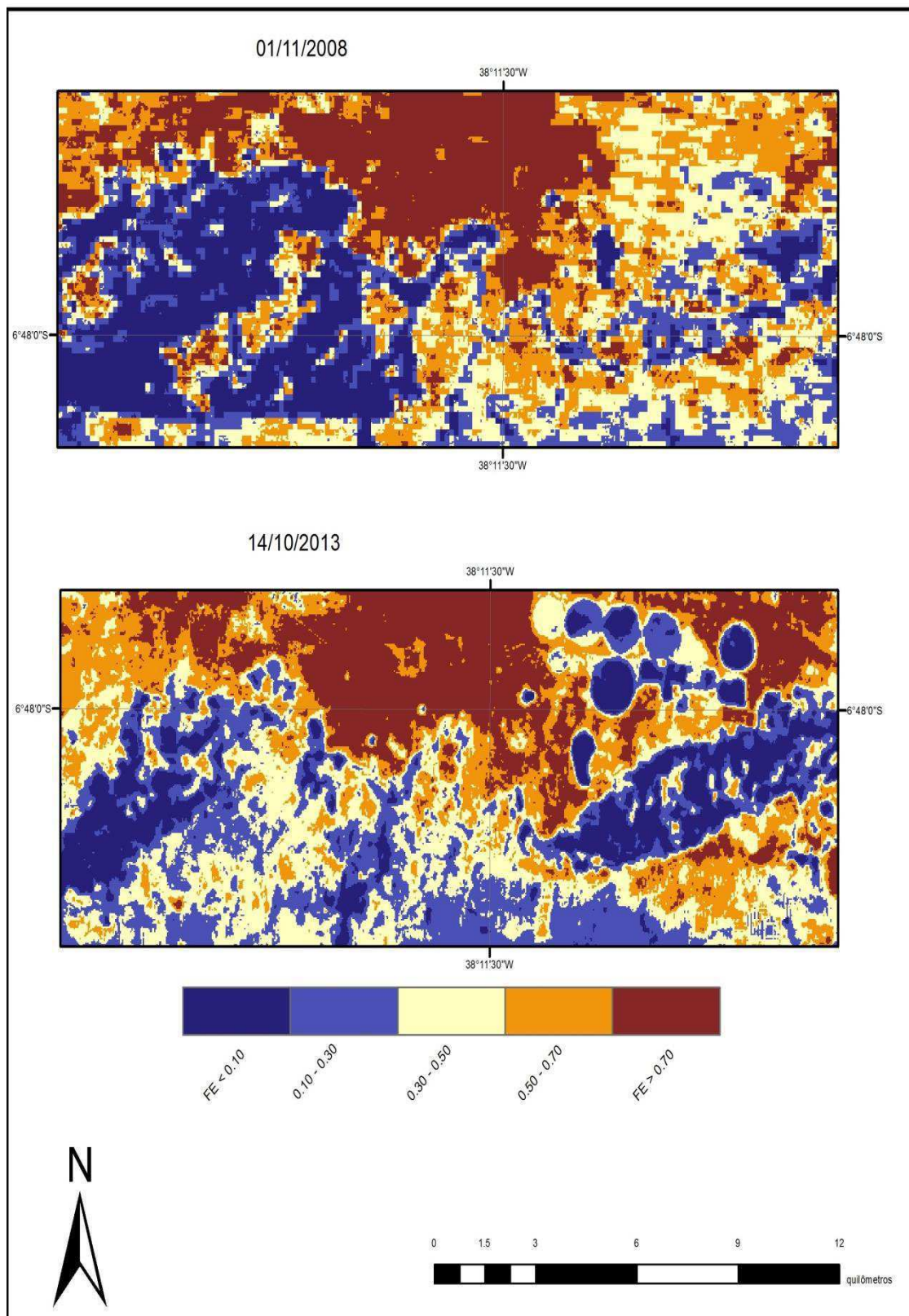


Figura 4.20 - Mapas temáticos da fração evaporativa obtidos dos produtos Landsat 5 e Landsat 8 no PISG nos anos de 2008 e 2013

4.1.7 – Mapas temáticos da evapotranspiração diária

A taxa evapotranspirativa está relacionada com a temperatura e umidade do ar, velocidade do vento, intensidade e duração da radiação solar, além do status da água na planta e/ou no solo, e em menor escala do número, tamanho das folhas e arquitetura das plantas (PEREIRA et al., 1997). Em se tratando da determinação da evapotranspiração por imagens orbitais, o SEBAL é o algoritmo que mais amplamente tem sido utilizado na última década (BASTIAANSSEN et al., 1998; 2005; SILVA et al., 2012; ALLEN et al., 2002; BEZERRA et al., 2008).

Nas Figuras 4.17 e 4.18 estão representados os mapas temáticos da evapotranspiração real diária ET_{24h} (mm) para os dias estudados utilizando o SEBAL. Observa-se que as classes de valores da ET_{24h} situados entre 5,0 e 7,0 mm dia^{-1} localizam-se no PISG, representada pela cor azul. A classe $ET_{24h} < 2,0$ mm são típicas de solo exposto ou com pouca cobertura vegetativa (cor marron). Na imagem de 14/09/2008 fica nítida a presença e interferência de nuvens. Em todas as imagens há uma grande presença de pixels com valores inferiores a 3,0 mm na cor amarelo/alaranjado, que sofre um aumento perceptível nos meses de outubro a dezembro, resultantes da grande redução na disponibilidade hídrica das áreas de sequeiro. Em todas as cenas os valores que variam de 1,0 mm dia^{-1} a 3,0 mm dia^{-1} são locais de solo com grande exposição ou áreas em início de plantio.

Se depreende da análise visual das imagens da ETr que os valores mais elevados estão relacionados às áreas irrigadas, principalmente aquelas do PISG I e de sua expansão, o PISG II. Ao se comparar as imagens de 2008 contra as de 2013, se verifica que a ETr em 2013 apresentou valores visivelmente menores que os de 2008. Esta diminuição nos valores da ETr, que no caso foram obtidas pelo novos sensores OLI/IRTS do Landsat 8, devem estar associados a problemas de calibração que ainda não foram devidamente equacionados. Mais recentemente, a NASA (2014) divulgou relatório dando conta de problemas de calibração no sensor termal – IRTS, mas também no que mede a radiância das bandas reflectivas, caso do OLI. Como discutido anteriormente, os valores do saldo em 2013 se mostraram bem menores que os de 2008, e isso deve estar relacionado aos problemas de calibração mencionados acima.

Depreende-se das análises dos mapas da ETr de 2008 que as áreas do PISG I evidenciam um maior número de pixels com valores da ETr próximos aos da ETo. No entanto, os mapas de 2013 não evidenciam que haveria uma mesma quantidade de pixels do PISG I com padrões próximos as da ETo, e sim que teria havido uma redução de tais pixels,

particularmente nas imagens dos dias 12/9/2013 e 28/9/2013. No entanto, nesses dois dias há sinais de que no PISG II haveria um maior número de pixels com valores da ETr próximos ao da ETo. Isso pode ser consequência das reduções nas irrigações, o que é um fato, mas que também se associa aos problemas de calibração do OLI/TIRS que impactam negativamente o Rn e a ETr. De concreto, os valores do saldo em 2013 foram bem inferiores aos de 2008, o que consequentemente impacta negativamente a ETr. Uma recomendação de SILVA et al. (2012), qual seja, de que se compare os valores da ETo de dado dia e área, com os extremos superiores da ETo obtidos por sensoriamento remoto, para se concluir sobre a consistência dos valores da ETr SEBAL. Nesse sentido, os valores da ETo diária dos DAS = 241, 257, 305, 321 e 353 do ano de 2008 foram respectivamente iguais 5,5 mm, 5,6 mm, 5,9 mm, 5,8 mm e 6,1 mm, e aqueles relacionados com o DAS = 175, 255, 271, 287 e 331 do ano de 20013 foram respectivamente iguais 3,7 mm, 6,4 mm, 6,2 mm, 7,5 mm e 6,1 mm. Percebe-se que no ano de 2013 os valores da ETo foram virtualmente inferiores ao da ETo, o que será levado em consideração ao se validar os resultados e nas estimativas dos erros.

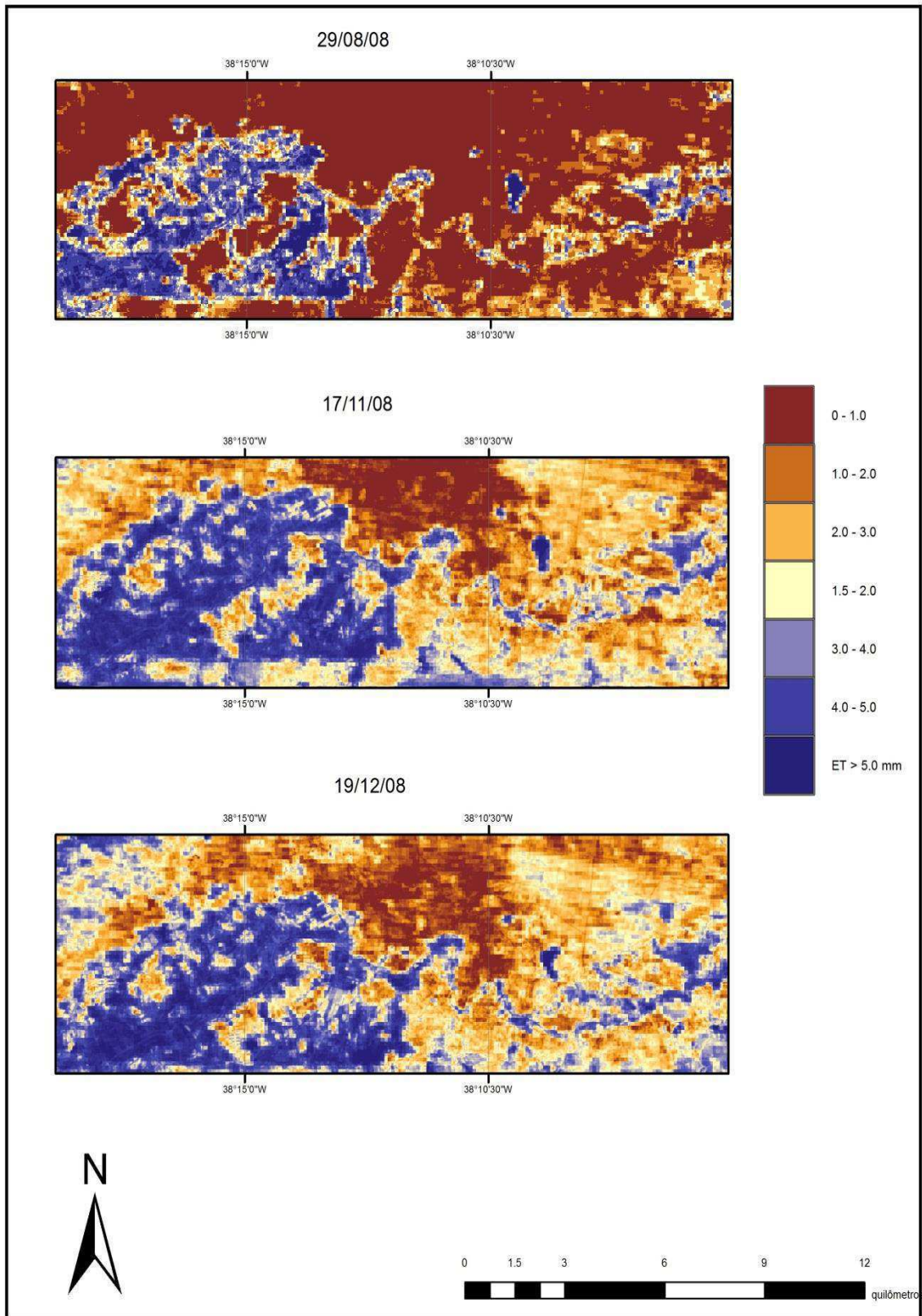


Figura 4.21 – Mapas temáticos da evapotranspiração diária ETr (mm) obtidos pelo Landsat 5 no PISG referentes aos dias selecionados para a pesquisa em 2008

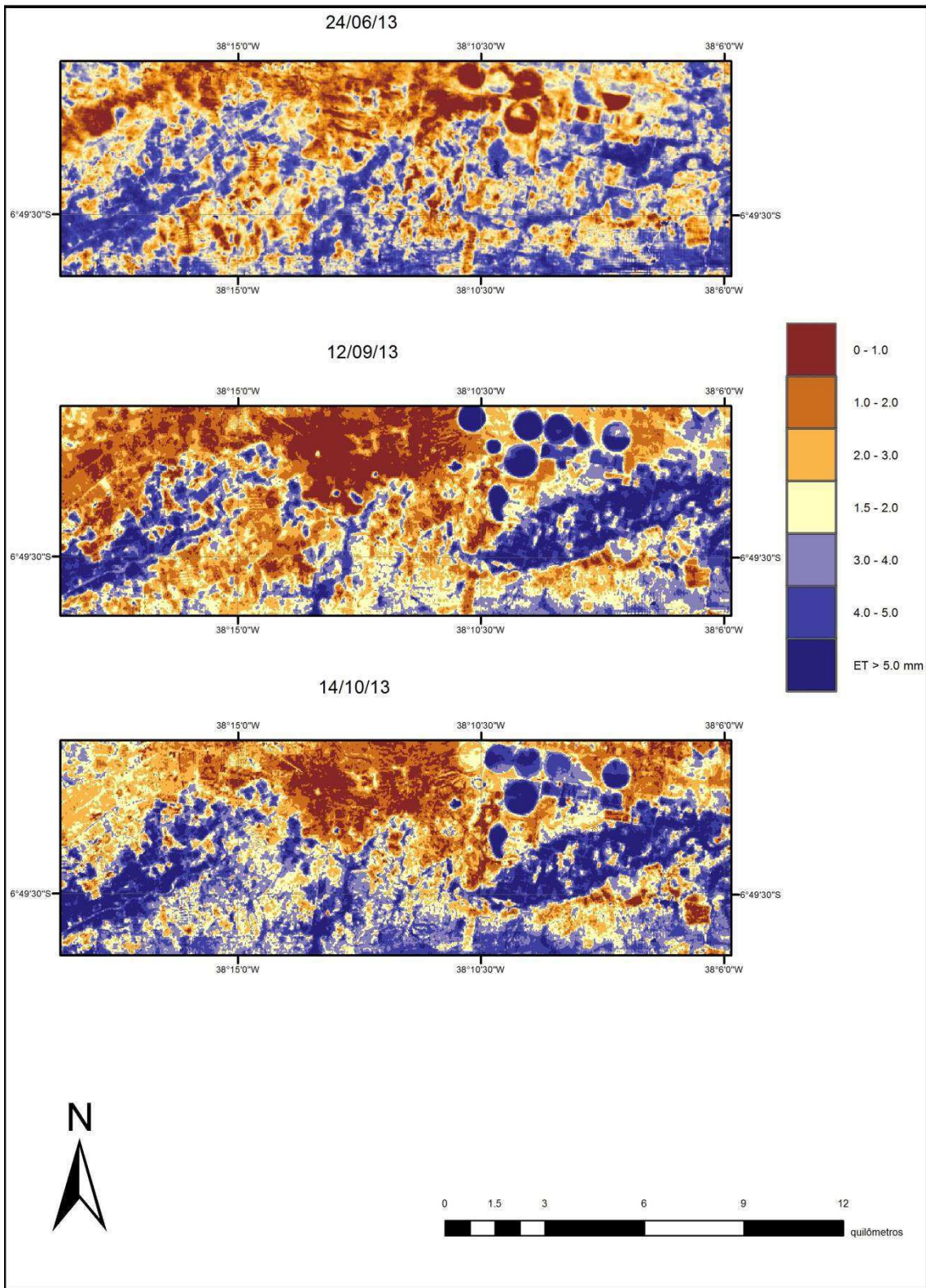


Figura 4.22 – Mapas temáticos da evapotranspiração diária ETr (mm) obtidos pelo OLI/IRTS - Landsat 8 no PISG referentes aos dias selecionados para a pesquisa em 2013

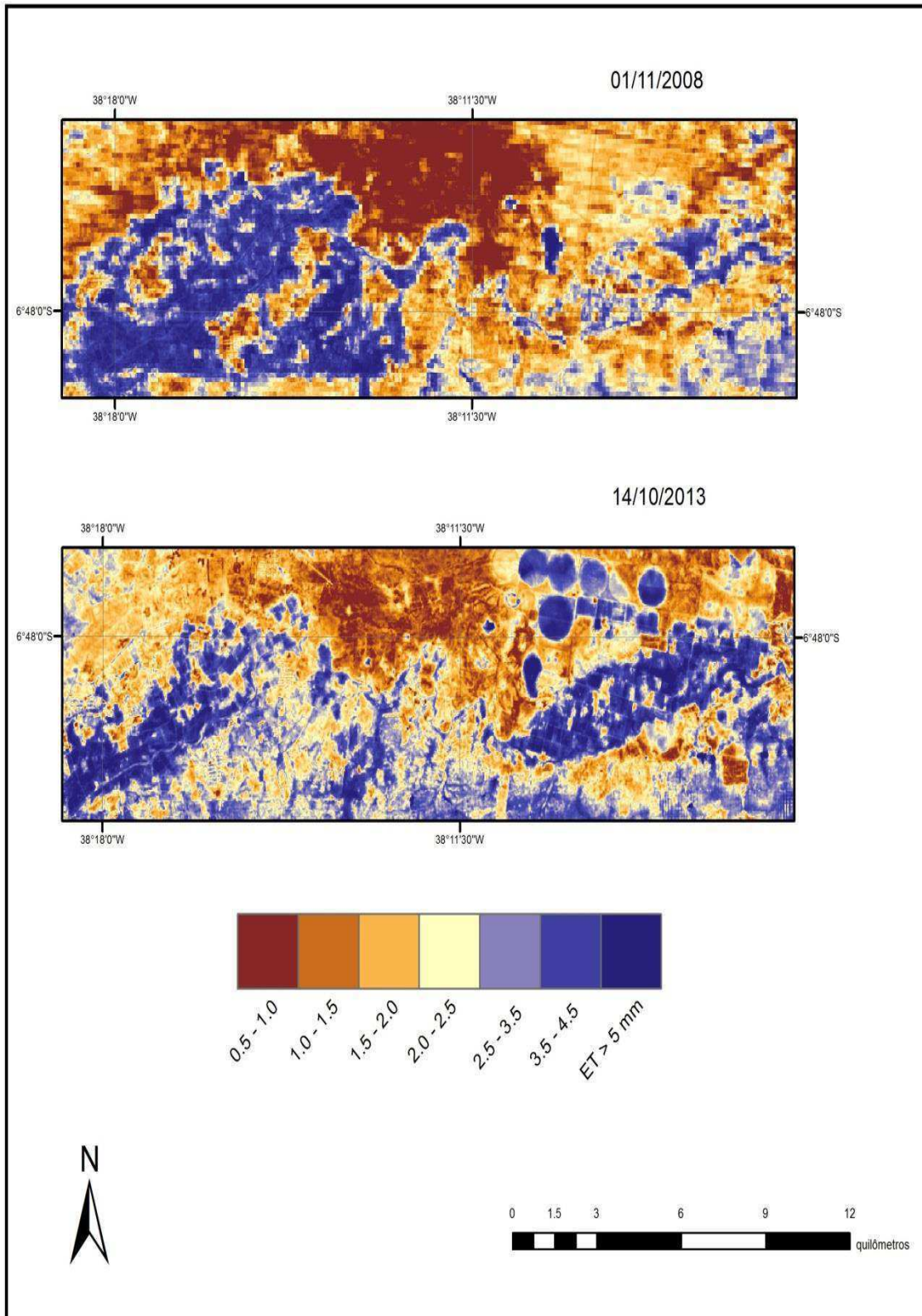


Figura 4.23 - Mapas temáticos da evapotranspiração obtidos dos produtos Landsat 5 e Landsat 8 no PISG nos anos de 2008 e 2013

4.1.8 - Análise das imagens da evapotranspiração MODIS

Na Figura 4.19 estão representados os mapas da ETr obtidos com o produto MOD16, com resolução de 1 km e composição de oito dias. De um modo geral, os valores da ETr se mostraram substancialmente superiores aos obtidos com o SEBAL, mas se mostraram também bem superiores aos valores da ETo, o que permite que se conclua que o MOD16 tem superestimado os valores da ETr nas áreas da bacia do Alto Piranhas e, em particular, no PISG. Há diferenças muito marcantes entre os fundamentos de cômputo da ETr MODIS e SEBAL/METRIC. Os dados meteorológicos extraídos de reanálises pode constituir séria fonte de imprecisão, mas as questões relativas ao cômputo da resistência da cultura pode ser o mais expressivo. O fato é que os resultados obtidos nesta pesquisa demonstram claramente a superestimava da evapotranspiração real com o MOD16.

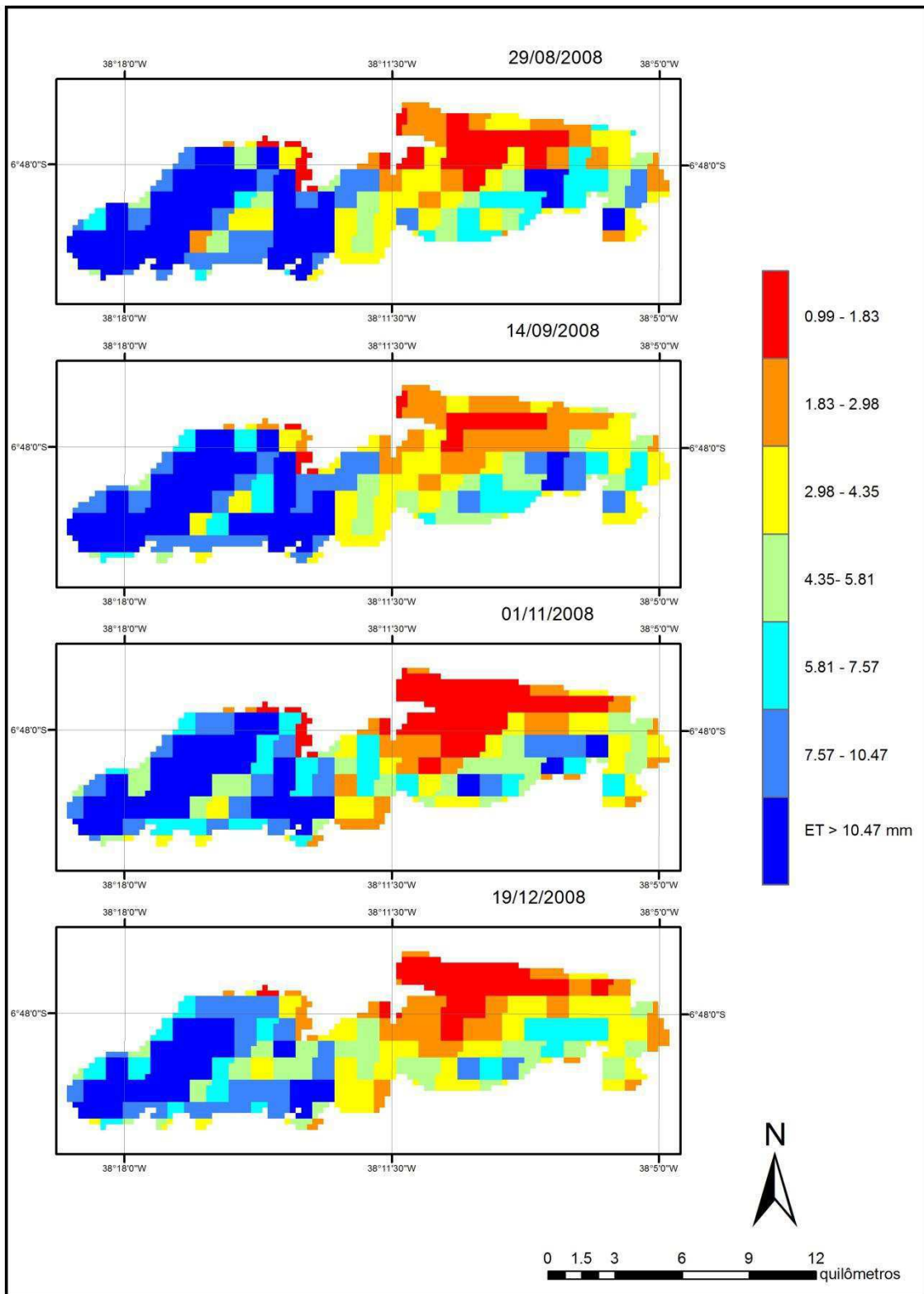


Figura 4.24 – Mapas temáticos da evapotranspiração real obtidos extraídos do MOD16 para os dias selecionados no ano de 2008

Tabela 4.2 – Datas das imagens, evapotranspiração de referência - ET_o (mm), albedo - α adimensional), saldo de radiação diário - R_{n24h} ($W m^{-2}$) e evapotranspiração real diária SEBAL - ET_{sebal} , e evapotranspiração segundo FAO-56 (E_{TFAO}) - (mm) referentes aos dias selecionados para a pesquisa

Data	Área coqueiro I				Área coqueiro II				Área vegetação nativa				
	ET_o	α	R_{n24h}	ET_{sebal}	ET_{FAO}	α	R_{n24h}	ET_{sebal}	ET_{FAO}	α	R_{n24h}	ET_{sebal}	ET_{FAO}
29/ago/2008	5,5	0,22	105,01	4,4	4,95	0,23	102,1	5,1	4,95	0,29	169,2	1,2	-
14/set/2008	5,4	0,17	160,64	4,6	4,86	0,16	158,9	5,6	4,86	0,16	158,9	0,9	-
01/nov/2008	5,9	0,18	169,02	5,1	5,31	0,17	167,3	5,1	5,31	0,20	110,1	1,4	-
17/nov/2008	5,8	0,21	162,43	5,0	5,22	0,14	189,3	5,0	5,22	0,17	167,1	1,3	-
19/dez/2008	6,1	0,19	176,26	5,1	5,49	0,22	168,2	5,2	5,49	0,21	162,2	1,2	-
24/06/2013	3,7	0,12	115,02	2,9	3,33	0,12	118,3	3,2	3,33	0,15	110,0	-	-
12/set/2013	6,4	0,27	136,22	2,5	5,76	0,20	157,8	2,4	5,76	0,16	155,7	5,1	5,76
28/set/2013	6,2	0,24	149,16	2,6	5,58	0,21	161,0	2,1	5,58	0,15	153,8	5,3	5,58
14/out/2013	7,5	0,20	157,98	3,3	6,75	0,23	165,7	6,0	6,75	0,27	174,6	4,6	6,75
27/nov/2013	6,1	0,22	157,14	3,7	5,49	0,18	161,8	2,8	5,49	0,13	153,9	2,7	5,49

4.19 - Quantificação do Volume de água do Perímetro Irrigado

De posse dos resultados acima, foi calculado o volume de água evapotranspirado correspondente as áreas irrigadas do PISG, neste estudo foram selecionados todos os pixels com NDVI > 0,40. Para tanto, admitiu-se que em virtude de prevalecerem no PISG culturas perenes então a ET_o acumulada em cada mês foi multiplicada pela imagem da Fração Evaporativa de Referência, como adotado por Allen et al. (2007b) e Teixeira et al. (2009). Logo, o volume de água evapotranspirada em cada um dos meses de estudo está representado na Tabela 4.3. Como pode ser visto, os volumes dos meses agosto, setembro e novembro foram respectivamente da ordem de 8,3, 8,4 e 8,6 milhões de m^3 , com média igual a 8,4 milhões de m^3 . De acordo com os dados fornecidos pela AESA a capacidade máxima do açude de São Gonçalo é 44.600.000 m^3 , ou seja, depreende-se que o volume de água evapotranspirado no semestre mais seco do ano (julho a dezembro) é da ordem de 50 milhões

de m³; portanto incompatível com a capacidade desse açude. Logo, o mesmo não suportaria a irrigação deste PISG, caso não recebesse uma recarga de água considerável dos Rios Piranhas e Rio do Peixe. É importante destacar que a eficiência de uso de água no PISG não deve diferir de outros grandes projetos irrigados do Brasil e que, portanto, conclui-se que o volume de água empregado nas irrigações das diversas culturas do PISG deve ultrapassar a ETr em pelo menos 40%, o que implica num volume apenas no semestre mais seco da ordem de 70 milhões de m³.

Tabela 4.3 – Meses de maior demanda de água para as irrigações no PISG – Mês, Área total irrigada – ATI (ha), evapotranspiração de referência FAO-56 mensal – ETo_mensal (mm), evapotranspiração real acumulada mensal – ETr_acum (mm) no PISG, razão entre a ETr acumulada mensal e a ETo acumulada mensal – RETr_ETo, volume total evapotranspirado mensalmente – Vol_ETr (m³) no PISG, e volume total de água aplicado mensalmente - Vol_Tot_Apli (m³) no PISG, no ano de 2008.

Mês	ATI (ha)	ETo_mensal (mm)	ETr_Acum (mm)	RETr_ETo	Vol_Total Evapotranspirado
Julho	3552	126,4	151.500,1	0,693	3.133.777,2
Agosto	3552	154,3	151.500,3	0,693	3.825.244,8
Setembro	3551	161,7	147.341,2	0,693	3.970.845,3
Outubro	3552	173,0	159.396,0	0,719	4.391.984,8
Novembro	3573	174,9	171.450,8	0,744	4.613.345,4
Dezembro	3572	177,7	197.137,4	0,814	5.167.124,0

Tabela 4.4 – Meses de maior demanda de água para as irrigações no PISG – Mês, Área total irrigada – ATI (ha), evapotranspiração de referência FAO-56 mensal – ETo_mensal (mm), evapotranspiração real acumulada mensal – ETr_acum (mm) no PISG, razão entre a ETr acumulada mensal e a ETo acumulada mensal – RETr_ETo, volume total evapotranspirado mensalmente – Vol_ETr (m³) no PISG, e volume total de água aplicado mensalmente - Vol_Tot_Apli (m³) no PISG, no ano de 2013.

Mês	ATI (ha)	ETo_mensal (mm)	ETr_Acum (mm)	RETr_ETo	Vol_Total Evapotranspirado
Julho	3552	126,4	151.500,1	0,693	3.133.777,2
Agosto	3552	154,3	151.500,3	0,693	3.825.244,8
Setembro	3551	161,7	147.341,2	0,693	3.970.845,3
Outubro	3552	173,0	159.396,0	0,719	4.391.984,8
Novembro	3573	174,9	171.450,8	0,744	4.613.345,4
Dezembro	3572	177,7	197.137,4	0,814	5.167.124,0

Evolução mensal do volume armazenado nos últimos 12 meses



Figura 4.25 – Representação gráfica do volume água armazenada nos últimos 12 meses do açude de São Gonçalo-PB. Fonte: AESA



Figura 4.26 – Representação gráfica da evolução do volume armazenado nos últimos 10 anos do açude de São Gonçalo-PB. Fonte: AESA

4.2 – Mapas temáticos da produtividade primária bruta

A fotossíntese é um dos processos fisiológicos mais importantes a vida no nosso planeta e depende fortemente das condições atmosféricas e das condições sanitárias e de umidade da própria planta. As temperaturas muito elevadas, bem como muito baixas comprometem o metabolismo das plantas. As altas temperaturas foliares têm sido apontadas por muitos autores, como o principal fator que afeta a fixação de carbono nas diversas etapas do processo (DALMARGO, 2009). Considera-se que para ecossistemas naturais, a dinâmica do GPP seja descrito pela dinâmica da temperatura do ar e da radiação fotossinteticamente ativa - RFA (YAN et al., 2009; WANG et al., 2010). Uma variável importante para o cômputo da GPP é o IVDN, que apresentou valor médio em todos os dias selecionados para pesquisa próximos a 0,65. Outra variável importante é a fração evaporativa, que indica a condição hídrica das plantas.

Nas figuras 4.27 e 4.28 estão representados os valores da GPP obtidos pelos sensores TM e OLI/TIRS dos anos de 2008 e 2013 respectivamente. Observa-se com clareza que nas áreas irrigadas do PISG I e PISG II, mas também na vegetação ciliar, os valores da GPP são destacados, assumindo valores superiores a $10 \text{ (gCm}^{-2}\text{dia}^{-1}\text{)}$. Na área noroeste do recorte, correspondente ao curso do rio do Peixe se observa também a sua influência na fixação de carbono. Os padrões da GPP relativo aos anos de 2008 e 2013 são semelhantes, mas percebe-se que há uma diminuição nos seus valores nas áreas do PISG I. Já nas áreas do PISG II houve um aumento substancial do número de pixels com valores elevados, resultante da expansão acelerada do PISG II entre 2008 e 2013.

Na Tabela 4.3 estão representados os dados empregados no cômputo da GPP segundo metodologia adotada nesta pesquisa.

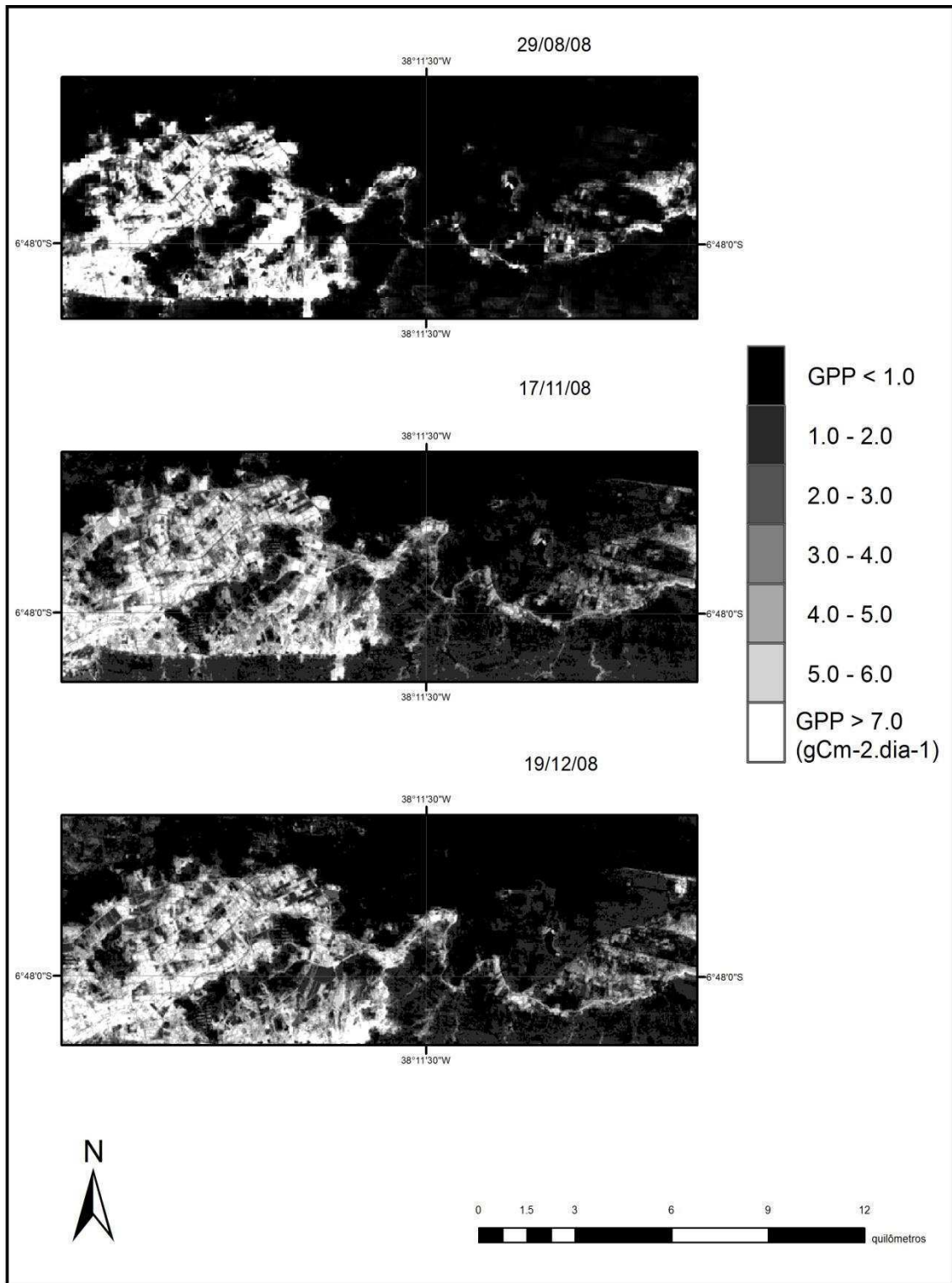


Figura 4.27 - Mapas temáticos da produtividade primária bruta obtidos pelo TM - Landsat5 no PISG referentes aos dias selecionados para a pesquisa em 2008

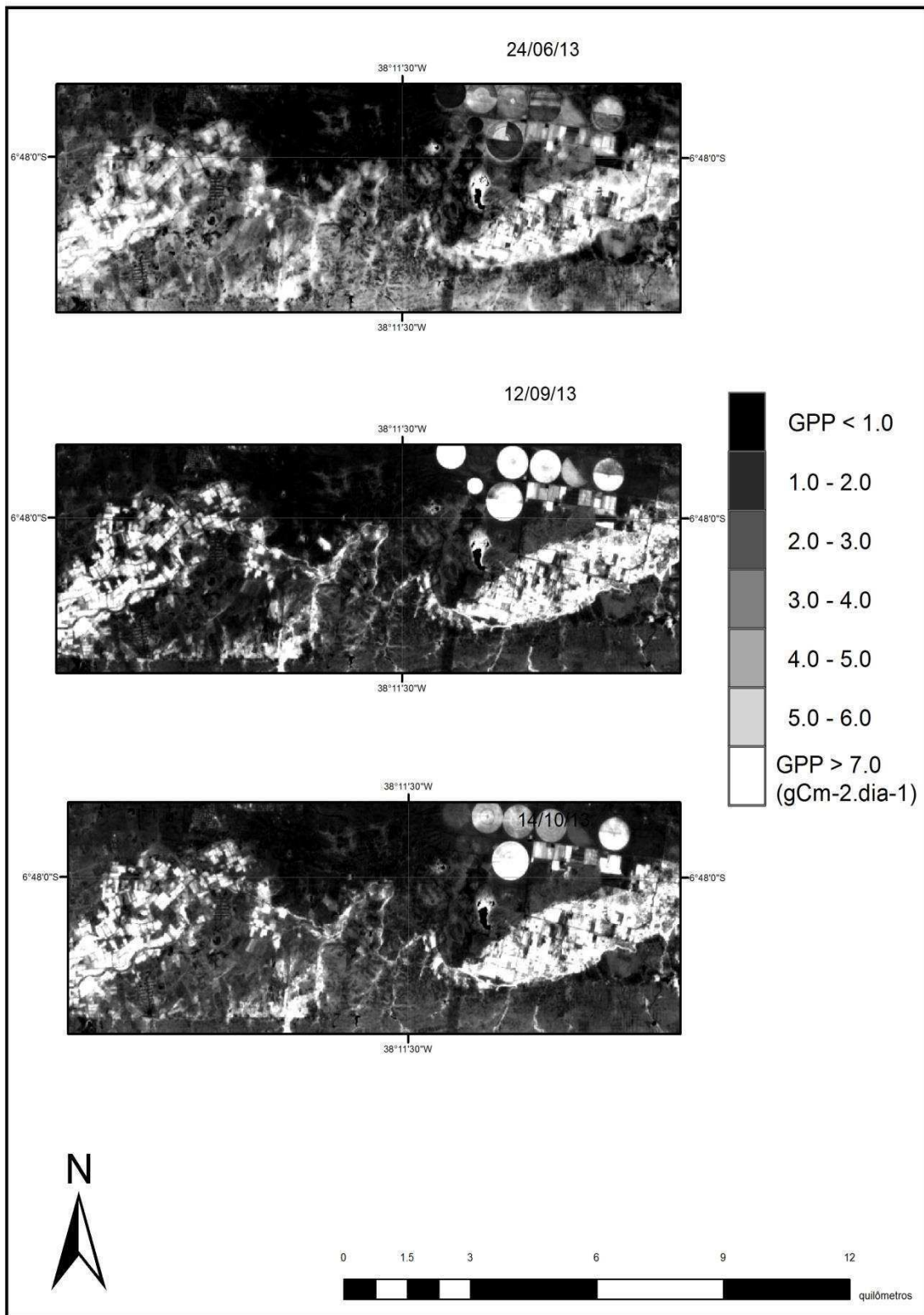


Figura 4.28 - Mapas temáticos da produtividade primária bruta obtidos pelo OLI/IRTS - Landsat 8 no PISG referentes aos dias selecionados para a pesquisa em 2013

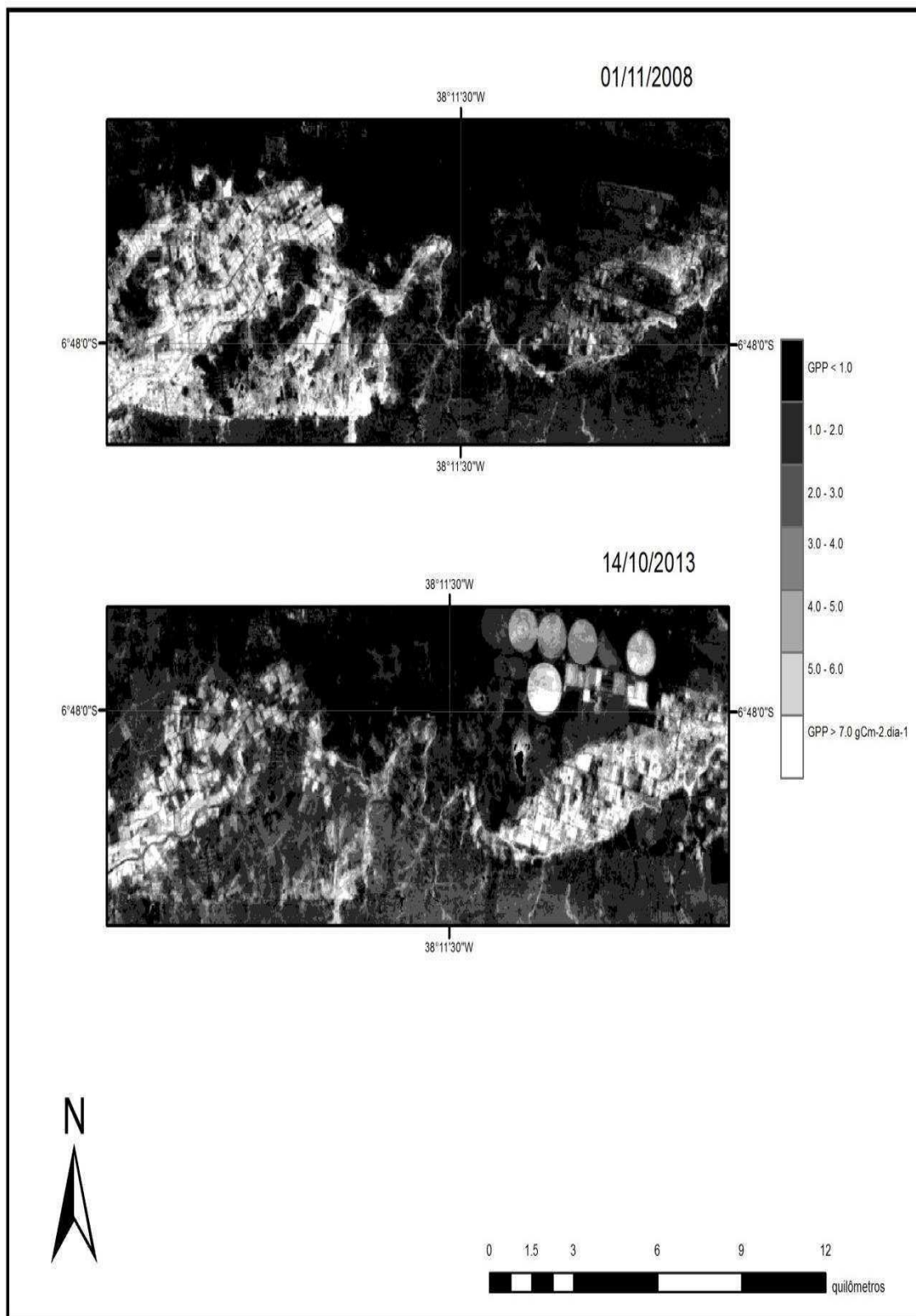


Figura 4.29 - Mapas temáticos da produtividade primária bruta obtidos dos produtos Landsat 5 e Landsat 8 no PISG nos anos de 2008 e 2013

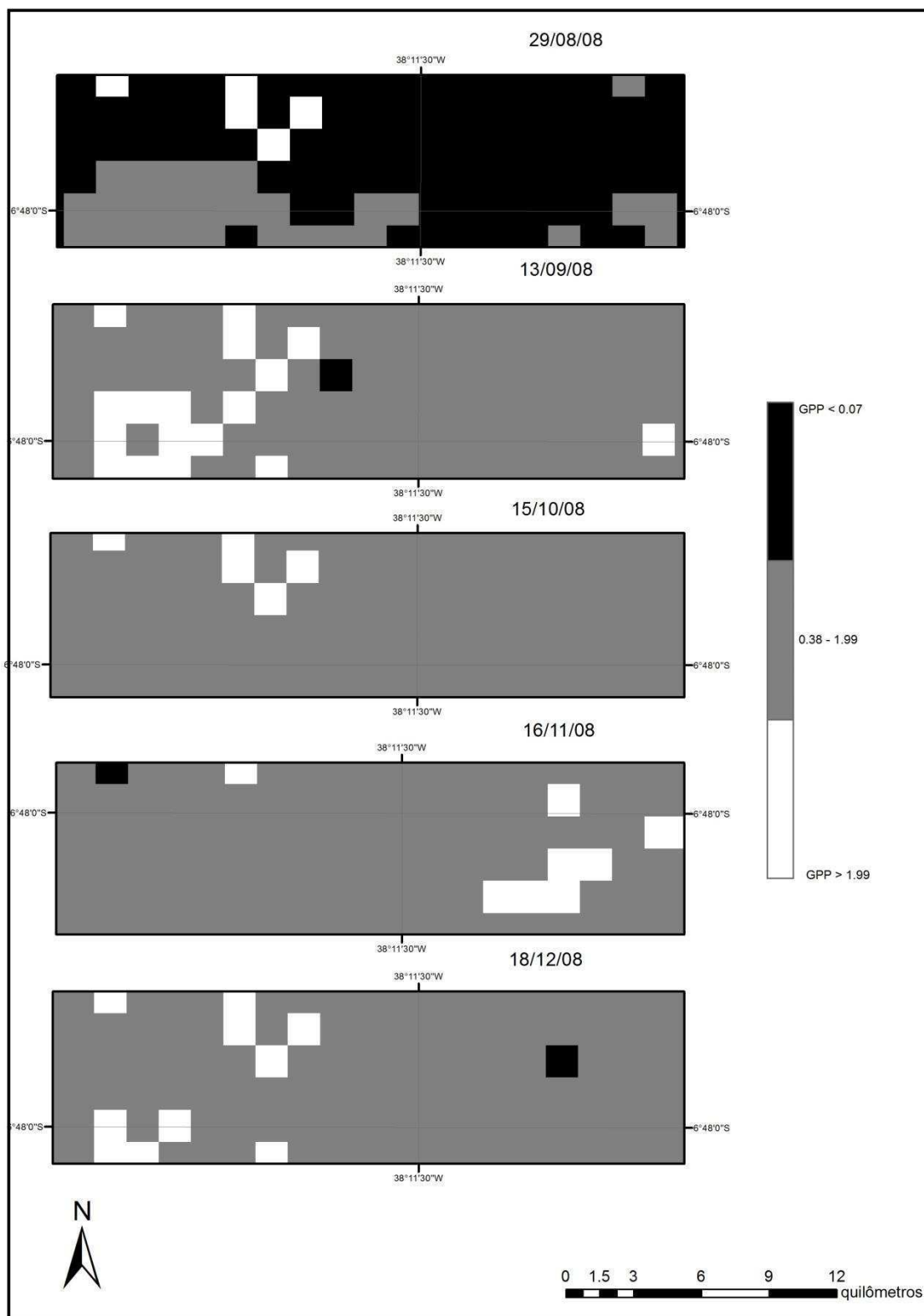


Figura 4.30 – Mapas temáticos da produtividade primária bruta obtidos extraídos do MOD17A2 para os dias selecionados no ano de 2008

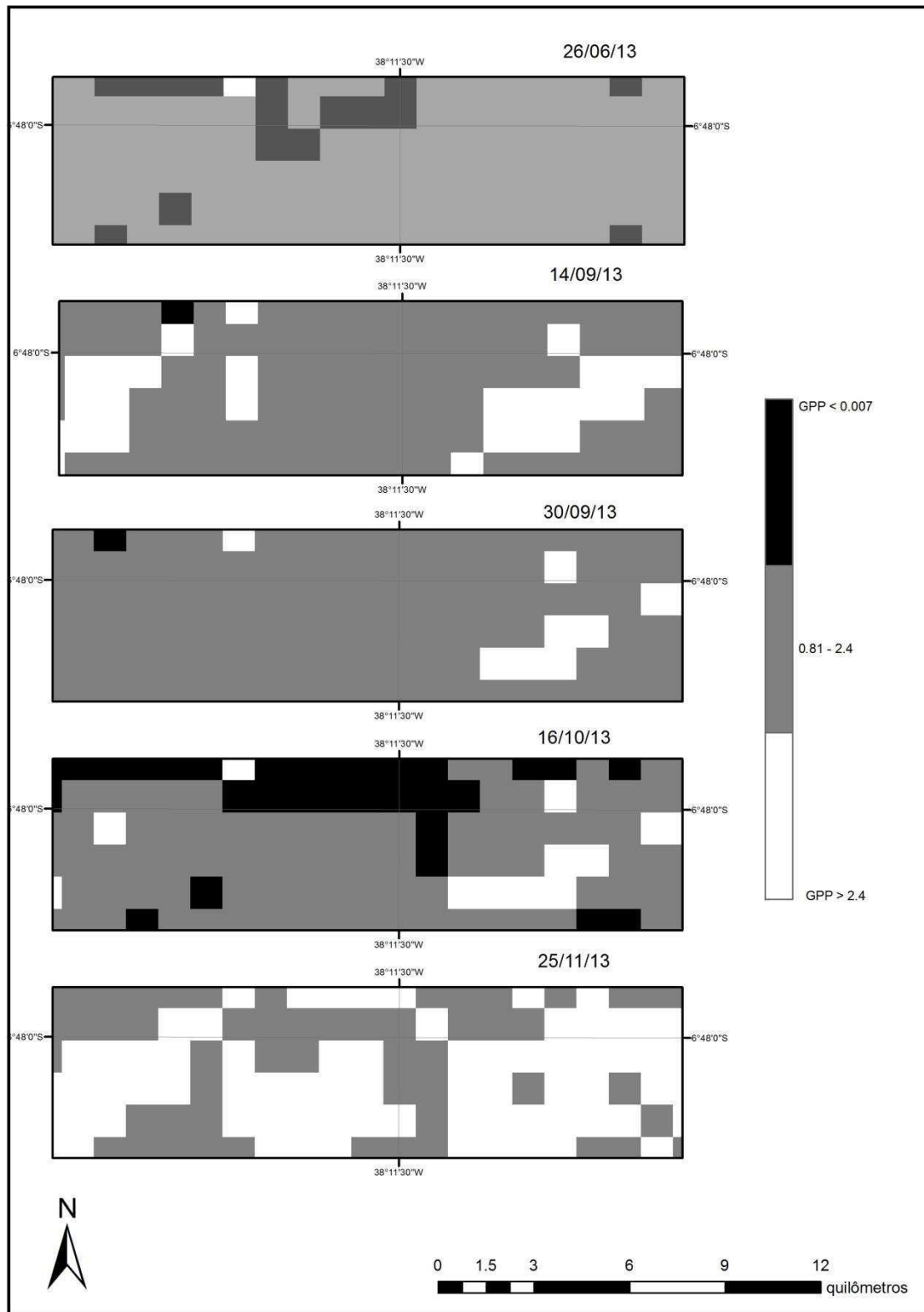


Figura 4.31 – Mapas temáticos da produtividade primária bruta obtidos extraídos do MOD17A2 para os dias selecionados no ano de 2013

Tabela 4.5 – Datas das imagens do TM e OLI/TIRS, ângulo zenital do Sol – Z(graus), quadrado da razão entre a distância Terra-Sol e seu valor médio – dr, cosseno de Z – cos Z, temperatura do ar – T_a (°C), umidade relativa do ar – UR (%), pressão atmosférica – P_o (KPa), radiação fotossinteticamente ativa – RFA (Wm^{-2}) e transmitância atmosférica - $\tau_{oc,ins}$ no momento da passagem do satélite na área de estudo referentes aos dias selecionados para a pesquisa.

Data	Z	dr	Cos Z	T_a (°C)	UR (%)	P_a (KPa)	RFA_{24h} (Wm^{-2})	$\tau_{oc,ins}$
29/agos/08	35,30	0,9828	0,8162	29,1	46,2	98,1	12,23	0,737
14/set/08	31,84	0,9912	0,8843	29,2	47,1	98,9	12,13	0,744
1/nov/08	27,94	1,0174	0,8834	29,5	45,0	98,7	13,15	0,745
17/nov/08	29,48	1,0244	0,8705	28,6	46,3	98,3	13,19	0,745
19/dez/08	35,53	1,0324	0,8335	29,6	47,5	93,4	13,85	0,742
24/jun/13	41,08	0,9673	0,7538	25,9	46	98,9	9,64	0,733
12/set/13	28,72	0,9895	0,8770	28,5	32,5	98,7	12,84	0,760
28/set/13	25,51	0,9025	0,9025	30,0	38,5	98,9	13,05	0,753
14/out/13	23,78	1,0075	0,9151	30,2	36,5	98,8	13,15	0,756
27/nov/13	25,71	1,0275	0,9010	30,1	45,5	98,2	10,37	0,746

Tabela 4.6 Datas das imagens do GPP segundo imagens TM - GPP_{TM} ($gC m^{-2} dia^{-1}$), segundo imagens OLI/TIRS – $GPP_{OLI/TIRS}$ ($gC m^{-2} dia^{-1}$), segundo o produto MOD17A2 – GPP_{MOD} ($gC m^{-2} dia^{-1}$), GPP médio no PISG – $GPP_{médio}$ ($gC m^{-2} dia^{-1}$), GPP integrado em toda área irrigada do PISG – GPP_{PISG} ($tonC dia^{-1}$) referentes aos dias selecionados para a pesquisa

DATA	GPP_{TM}	GPP_{MOD}	$GPP_{médio}$	GPP_{PISG}
29/agos/08	9,64	8,50	3,85	248,2
14/set/08	7,03	8,31	4,15	212,4
1/nov/08	8,02	6,87	4,16	233,1
17/nov/08	10,34	5,58	4,10	200,3
19/dez/08	13,20	8,01	4,41	295,3
24/jun/13	8,40	7,02	2,93	235,1
12/set/13	12,76	9,13	6,81	301,4
28/set/13	10,20	8,43	6,61	298,8
14/out/13	13,33	6,48	4,70	310,6
27/nov/13	9,40	8,92	6,20	276,1

4.3 - Validação dos resultados

Os dados diários de temperatura máxima e mínima, umidades relativas do ar máxima e mínima, pressão atmosférica média diária, velocidade do vento e radiação solar global diária, obtidos na estação automática do Instituto Nacional de Meteorologia, localizada em São Gonçalo, PB, foram utilizados para obtenção da evapotranspiração de referência de área segundo o método FAO-56 de Penman-Monteith (Allen et al., 1998), para todo o ano de 2008 e 2013. Com base no coeficiente de cultura (K_c) do coqueiro-anão, obteve-se a evapotranspiração FAO-56 – ET_{rFAO} pelo produto $ET_o \times K_c \times K_a$ (ALLEN et al., 1998), em que K_a é coeficiente de ajuste dependente do fator de cobertura do solo. Embora o K_c do coqueiro irrigado após o quinto ano de idade no Semiárido brasileiro tenha $K_c = 1,0$ (MIRANDA et al., 2007; SOUSA et al., 2011), há de se considerar ainda um coeficiente de ajuste – K_a (ALLEN et al., 1998) que depende da fração de cobertura do solo. Depreende-se da pesquisa de Miranda et al. (2007) que esse valor no quinto ano de idade do coqueiro anão é igual a 0,8. Esse método de determinação da evapotranspiração real de cultivos irrigados é o mais empregado nas práticas de irrigação e foi utilizado no procedimento de validação do SEBAL, para os dias com imagens disponíveis nos anos de 2008 e 2013. Para validação da evapotranspiração obtida com o SEBAL no PISG, consideraram-se três alvos: 2 pomares de coqueiro e uma área de vegetação nativa (Tabela 4.3).

Ao se avaliar os erros na obtenção da ETr segundo o SEBAL, utilizando a ETr FAO-56 como referência, foram obtidos no ano de 2008 e áreas de coqueiro I (coqueiro II) Erro Absoluto Médio – EAM, Erro Relativo Médio – ERM e Raiz do Erro Quadrado Médio – REQM, respectivamente iguais a: 0,33 mm, 6,35 % e 0,35 mm (0,41 mm, 8,81 % e 0,43 mm), enquanto que no ano de 2013 nesses mesmos coqueiros, esses erros foram iguais a: 2,78 mm, 41,30 % e 2,64 mm (2,08 mm, 36,9 % e 2,50 mm). No pivô com coqueiro também irrigado de 2013, esses, no entanto, foram bem menores: 1,47 mm, 24,8 % e 1,80 mm, em comparação com os outros pomares da mesma cultura e ano. Se depreende, de tais dados, que além dos problemas reportados da calibração do OLI/IRTS, que as irrigações devem ter afetado também os valores da ETr , o que poderia, a depender dos turnos de rega adotados em 2013 ante uma crise efetiva de falta de água, tirar os cultivos irrigados da condição padrão, o que tornaria mais complexa a estimativa da ETr via FAO-56. Essas questões devem ser levadas em consideração em na continuidade da pesquisa, e aguardar as novas imagens OLI/TIRS e aquelas já obtidas (e aqui utilizadas) que estão sendo reprocessadas para posterior distribuição (NASA, 2014).

Santos et al. (2010) obtiveram $EAM = 0,3 \text{ mm dia}^{-1}$ ao compararem a ET_{sebal} com medições com Balanço de Energia Baseado na Razão de Bowen – BERB. Gómes et al. (2005) e Sobrino et al. (2005) obtiveram diferenças em geral inferiores a $1,0 \text{ mm dia}^{-1}$, quando avaliaram o desempenho do S-SEBI.

5 – CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos com a pesquisa, foram extraídas as seguintes conclusões:

- 1 – O albedo da superfície obtido com o METRIC apresentou acentuada subestimativa dos seus valores, o que faz aumentar significativamente o saldo de radiação;
- 2 – Os mapas de temperatura da superfície - T_s gerados com o TIRS se mostraram bem superiores aos obtidos pelo TM, devido a problemas de calibração ainda não resolvidos com as bandas 10 e 11 do Landsat 8, comprometendo a precisão do balanço radiativo;
- 3 – A topografia das áreas de serra da bacia do Alto Piranhas impacta substancialmente os valores da radiação solar global incidente, em comparação com os interceptados por áreas planas e horizontais e, portanto, afetam os valores do saldo radiativo de tais áreas;
- 4 – Os valores da evapotranspiração real obtidos pelo SEBAL em três áreas com coqueiro irrigado (dois talhões) e vegetação nativa, apresentaram E_{Tr} no ano de 2008 superior aos valores obtidos em 2013, muito provavelmente decorrente de problemas de calibração dos sensores do Landsat 8, e possivelmente como resultado das restrições quanto à disponibilidade de água para irrigação verificado em 2013;

- 5 – A precisão da obtenção da ETr via SEBAL mais uma vez foi verificada, em particular com as imagens TM de 2008, segundo os erros empregados na sua quantificação;
- 6 – O produto de evapotranspiração disponibilidade no MOD16 apresentou nas áreas do PISG e vizinhanças valores substancialmente maiores que os obtidos com o SEBAL e também em relação à evapotranspiração de referência - ETo;
- 7 - As áreas irrigadas do PISG se mostraram grandes fixadores de carbono, evidenciado pelos altos valores da GPP obtidos em 2008 e 2013;
- 8 – Os resultados obtidos com o OLI/TIRS do Landsat 8 devem ser usados com certa cautela, em virtude dos problemas de calibração ainda não equacionados adequadamente.
- 9 - O volume de água evapotranspirado nos meses estudados representa 56,5 % do volume de água do açude de São Gonçalo

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/comites/piranhasacu>. Acesso em: 05/02/2011.

AHMAD, M. D.; TURRAL, H.; NAZEER, H. Diagnosing irrigation performance and water productivity through satellite remote sensing and secondary data in a large irrigation system of Pakistan. **Agricultural Water Management**, v.96, p.551-564, 2009.

ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M., 1998. **Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements**. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Roma, 300 p.

_____, TREZZA, R., TASUMI, M. Surface energy balance algorithms for land. **Advance training and user's manual**, version 1.0, p.98, 2002.

_____,TASUMI. M., MORSE, A., TREZZA, R. A Landsat-based energy balance and evapotranspiration model in Western US water rights regulation and planning. **Irrigation and Drainage Systems**, v.19, p.251-268, 2005.

_____,TASUMI. M., MORSE, A., TREZZA, R., BASTIAANSEN, W. G., MORSE, T., KRAMBER, W., WRIGHT, J. METRIC – High Resolution Satellite Qualification of Evapotranspiration.University of Idaho, Kimberly, Idaho, 2005.

_____, TASUMI, M., TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Model.**Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.133, n.4, p.380-394, 2007.

ANA – Agência Nacional de Águas. Site: <http://www.ana.gov.br>. Acesso em: 05/02/2012.

ANDERSON, L. O.; LATORRE, M. L.; SHIMABUKURO, Y. E.; ARAI, E; JÚNIOR, O. A. DE C. Sensor MODIS: uma abordagem geral. INPE-10131-RPQ/752, São José dos Campos, SP. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 58p, 2003.

ASCE-EWRI. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. ASCE-EWRI Standardization of Reference Evapotranspiration Task Committee Rep., ASCE, 2005.

ATAÍDE, K. R. P., SILVA, B. B. da., CAVALCANTI, E. P. Resultados preliminares da estimativa do saldo de radiação diurno usando imagens do sensor MODIS (Terra e Aqua) para dias de céu claro. **Revista Sodebras**, v.1, p.1-7, 2006.

AZEVEDO, P. V., SILVA, B. B. da, SILVA, V. P. R. da. Water requirements of irrigated mango or orchards in northeast Brazil. **Agricultural Water Management**, v.58, p.241-254, 2003.

_____, SILVA, B. B., SILVA, V. P. R. Water requirements of irrigated mango orchards in northeast Basil. **Agricultural Water Management**, v.58, p.241-354, 2006.

BALDOCCI, D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide Exchange rates of ecosystems: past, present and future. **Global Change Biology**, v9, p.479 – 492, 2003.

BASTIAANSEN, W. G. M. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. Wageningen: Wageningen Agricultural University, 1995. 273p. PhD Dissertation.

_____, MENENTI, M., FEDDES, R.A., HOLSLAG, A. A. M. A. Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) – Formulation. **Journal of Hydrology**, v.212-213, p.198-212, 1998a.

_____, 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) – Validation. **Journal of Hydrology**, v.212–213, p.213-229, 1998b.

_____, SEBAL – Based Sensible and Latent Heat Fluxes in the Irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v.229, p.87-100, 2000.

_____, 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.

_____, ALI, S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.94, p.321-340, 2003.

BLACKETT, M. Early analysis of landsat-8 thermal infrared sensor imagery of volcanic activity. **Remote Sensing**, n.6, p.2282-2295, 2014.

BEER, C.; REICHSTEIM, M.; TOMELLERI, E. et al. Terrestrial gross carbon dioxide uptake: global distribution and covariation with climate. **Science**, v.329, 834-838, 2010.

BEZERRA, B. G., SILVA, B. B., FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.23, n.3, p.305-317, 2008.

BEZERRA, B. G. **Balço de energia e evapotranspiração em áreas com diferentes tipos de cobertura de solo no cariri cearense através do algoritmo SEBAL**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, p.127, 2006.

_____, SILVA, B. B., FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.23, n.3, p.305-317, 2008.

BEZERRA, J. R. C. **Crescimento, desenvolvimento e sustentabilidade do algodoeiro BRS 200 – Marrom irrigado**. 88p. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

BISTH, G., VENTURINI, V., ISLAM, S., JIANG, LE. Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days. **Remote Sensing of Environment**, v.97, p.52-567, 2005.

BORGES, C., J., R.; AZEVEDO, P., V.; SILVA, V., P., R.; CAMPOS, J., H., C.; MOURA, M., S., B.; J., M.; SILVA, B., B. Influência do calor armazenado no sistema solo-planta no balanço de energia em pomar de mangueiras, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.14, p.393-399, 2008.

BORGES, V. P.; OLIVEIRA, A. S.; SILVA, B. B. Mapeamento e quantificação de parâmetros biofísicos e radiação líquida em área de algodoeiro irrigado. **Ciência e Agrotecnologia**, v.34, p.485-493, 2010.

BOS, M. G., BURTON, D. J., MOLDEN, D. J. Irrigation and drainage performance assessment. Practical guidelines. CABI Publishing, Comlenidge, USA, p.158, 2005.

BRASIL. Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. Sistema Curema Mãe D'água. Disponível em: <<http://www.dnocs.gov.br>. Reservatório Curema Mãe D'água - PB Acesso em 06 fev 2011.

BRITO, J. I. B. ; BRAGA, C. C. ; AZEVEDO, P. V. Variabilidade Interanual do Escoamento Superficial e da Infiltração de Água no Solo no Nordeste do Brasil. In: XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2002, Foz do Iguaçu. A meteorologia e a Gestão de Energia, 2003. p. 1734-1741.

BRUTSAERT, W. Evaporation into the Atmosphere, D-Reidel, Norwell, Mass. p.299, 1982.

CABRAL, O. M. R.; GASH, J. H. C.; ROCHA, H. R.; MARSDEN, C.; LIGO, M. A. V.; FREITAS, H. C.; TATSCH, J. D.; GOMES, E. Fluxes of CO₂ above a plantation of Eucalyptus in southeast Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.151, p.49–59, 2011.

CARNEIRO, J. V. **Fluxos turbulentos de CO₂ em uma área de arroz irrigado no RS**. 87p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

CBHPA – Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Piranhas-Açu. Site: www.piranhasacu.cbh.gov.br. Acesso em: 10/03/2011.

CHAVES, L. H. G., CHAVES, I. B., VASCONCELOS, A. C. F., LEÃO, A. B. Avaliação da salinidade dos neossolos dos perímetros irrigados de São Gonçalo e Engenheiro Arcoverde, PB. **Agropecuária Técnica**, v.26, n.1, p.15-21, 1995.

CHANDER, G., MARKHAN, B. Revised Landsat 5 – TM radiometric calibration procedures and post calibration dynamic ranges. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, v.41, p.2674-2677, 2003.

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Site: <http://www.cnrh-srh.gov.br>. Acesso em 07/02/2011.

CONRAD C, C.R, P. A, R.G., D. S, Schmidt M Time-series-generator – a flexible software module to generate and assess time series from NASA MODIS data products. 17. Symposium und Fachmesse für Angewandte Geoinformatik (AGIT). July 6th–8th 2007, Salzburg, Austria (in German)

COELHO, M. A., FERREYRA, F. F. Characterization of salt-affected soil in the semi-arid region of Northeastern Brazil. **Turialba**, v.36, n.2, p.171-178, 1986.

CORRÊA, M. M., KER, J. C et al. Atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos da região das várzeas de Sousa (PB). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n.2, paginas, 2003.

DI PACE, F. T.; SILVA, B. B.; SILVA, V. P. R.; SILVA, S. T. A. Mapeamento do saldo de radiação com imagens Landsat 5 e modelo de elevação digital. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, p.385-392, 2008.

DNOCS, Departamento Nacional de obras contra as secas, 1978.

DNOCS, Departamento Nacional de obras contra as secas, 1991.

DOORENBOS, J.; KASSAN, A.H. Efectos Del agua en el rendimiento de los cultivos. Roma: FAO,1979. 212 p. (Estudios FAO - Riego y Drenaje, 33)

FAO. FAOSTAT. **Agriculture Data**. Disponível em: <<http://faostat.fao.org>>. Acesso em 20/03/2013.

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

FALGE, E.; BALDOCCHI, D.; TENHUNEN, J.; AUBINET, M. et al. Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.113, n.1–4, p.53-74. 2002.

FEITOSA, J. R. P. **Uso de técnicas de sensoriamento remoto e imagens Landsat 5 - TM e NOAA-AVHRR na estimativa do balanço de radiação à superfície**.164p. Tese (Doutorado em Meteorologia), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande,2005.

FIELD, C. B.; RANDERSON, J. T.;MALMSTROM, C. M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v.51, p.74-88, 1995.

FOLHES, M. T. **Modelagem da evapotranspiração para gestão hídrica de perímetros irrigados com base em sensores remotos**. 189p. Tese (Doutorado em Meteorologia), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos,2007.

GALLON, M. M. P.; SANCHES, L.; PAULO, S. R. DE. Fluxo e perfil de dióxido de carbono no dossel uma floresta tropical de transição amazônica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.21, n.3, p.79-88, 2006.

GARCIA, G. J. Sensoriamento Remoto – Princípios e Interpretação de Imagens. 2 ed. Nobel. São Paulo, p.358, 1982.

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**, v.44, 225–241, p.1990.

GIONGO, P. R. Estimativa do balanço de radiação com técnicas de Sensoriamento remoto e dados de superfície, 94p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife-PE, 2008.

GIONGO, P.R. **Mapeamento do balanço de energia e evapotranspiração diária por meio de técnicas de sensoriamento remoto.** Tese (Doutorado), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2011, 122 p.

GITELSON, A. A.; VIÑA, A.; MASEK, J. G.; VERMA, S. B.; SUYKER, A.E. Synoptic Monitoring of Gross Primary Productivity of Maize Using Landsat Data. **IEEE Geosciences and Remote Sensing Letters**, v.5, n.2, p.133-137, 2008.

GOMES, H. F. Balanços de radiação e energia em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e cerrado no estado de São Paulo mediante imagens orbitais, 119p. Tese (Doutorado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande, 2009.

HILKER, T.; COOPS, N. C.; WULDER, M. A.; BLACK, T. A.; GUY, R. D. The use of remote sensing in light use efficiency based models of gross primary production: A review of current status and future requirements. **Science of the Total Environment**, v.404, p.411-423, 2008.

IMMERZEEL, W. W.; GAUR, A.; ZWART, S. J. Integrating remote sensing and a process-based hydrological model to evaluate water use and productivity in a south Indian catchment. **Agricultural Water Management**, v.95, p.11-24, 2008.

JIA, L., SU, Z., HURK, B., MENENTI, M., MONEE, A., DE BRUIN, H. A. R., YRISARRY, J. J. B., IBÁÑEZ, M. & CUESTA, A. Estimation of sensible heat flux using the Surface Energy Balance System (SEBS) and ATRS measurements. **Physics and Chemistry of the Earth**, v.28, p.75-88, 2003.

JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J.R.G.; VERMOTE, E.F.; MASUOKA, E.; WOLFE, R. E.; SALEOUS, N.; ROY, D.P.; MORISETTE, J.T. An overview of MODIS Land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**, v.83, n.1-2, p.3-15, 2002.

KALFAS, J. L.; XIAO, X.; VANEGAS, D. X.; VERMA, S. B.; SUYKER, A. E. Modeling gross primary production of irrigated and rain-fed maize using MODIS imagery and CO₂ flux tower data. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.151, p.1514-1528, 2011.

KARATAS, B. S.; AKKUZU, E.; UNAL, H. B.; ASIK, S.; AVCI, M. Using satellite remote sensing to assess irrigation performance in water user associations in the Lower Gediz Basin, Turkey. **Agricultural Water Management**, v.96, p.982-990, 2009.

KIDDER, S. Q. and T. H. Vonder Haar(1995).Satellite Meteorology – An Introduction, 466 pp.Academic Press, san Diego, CA, USA: [A comprehensive overview and meteorology].

KIRSCHBAUM, M.U.F.; KEITH, H.; LEUNING, R.; CLEUGH, H.A.; JACOBSEN, K.L.; VAN GORSEL, E.; RAISON, R.J. Modeling net ecosystem carbon and water exchange of a temperate Eucalyptus delegatensis forest using multiple constraints. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.145, p.48–68, 2007.

KUSTAS, W. P & NORMAN, J. M. Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over and surfaces.IAHS, **Hydrology Science Journal**, v.41, p.495-516, 1996.

LANG, A. R. G., MCNAUGHTON, K. G., FAZU, C., BRADLEY, E. F., OHTAKI, E. Inequality of eddy transfer coefficients for vertical transport of sensible and latent heats during advective inversions. **Boundary Layer of Meteorology**, n.25, p.25–4, 1983.

LEFSKY, M. A., TURNER, D. P., GUZY, M., COHEN, W. B. Combining lidar estimates of aboveground biomass and Landsat estimates of stand age for spatially extensive validation of modeled forest productivity. **Remote Sensing of Environment**, v.95, p.549-558, 2005.

LI, Z., YU, G., XIAO, X., LI, Y., ZHAO, X., REN, C., ZHANG, L., FU, Y. Modeling gross primary production of alpine ecosystems in the Tibetan Plateau using MODIS images and climate data. **Remote Sensing of Environment**, v.107, p.510-519, 2007.

LI, H.; ZHENG, L.; LEI, Y.; LI, C.; LIU, Z.; ZHANG, S. Estimation of water consumption and crop water productivity of winter wheat in North China Plain using remote sensing technology. **Agricultural Water Management**, v.95, p.1271-1278, 2008.

LILLESAND, T. M. & KIEFER, R. W. Remote Sensing and Image Interpretation. 4th Edition. John, Wiley & Sons, Inc. New York, p.73, 1993.

LILLESAND, T., R.W. Kieffer, and J. Chipman. 2007. Remote Sensing and Image Interpretation. 6th ed., John Wiley and Sons, New York, US.

MARKHAM, B. L.; BARKER, J. L. Landsat MSS and TM Post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures. EOSAT Landsat technical notes 1:3-8, earth observation satellite company, Lanham, Md, 1986.

MOREIRA, M. A. Fundamento do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação, 2^a edição (Revista e Ampliada), Editora UFV, Viçosa-MG, 307p, 2003.

MOREIRA, M. A. (2005) “*Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicações*”. 3^o edição. 2005. Editora UFV.

MENDONÇA, E. A.; DANTAS, R. T. Estimativa da evapotranspiração de referência no município de Capim, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v.14, n.2, p.196-202, 2010.

MIRANDA, F. R. de., GOMES, A. R. M., OLIVEIRA, C. H. C. de, MONTENEGRO, A. A. T., BEZERRA, F. M. L. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do coqueiro anão verde na região litorânea do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, v.38, n.2, 2007.

MONTEITH, J. L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal of Applied Ecology**, v.9, p. 747-766, 1972.

NASA - MODIS Atmosphere, disponível em <http://www.modis.gsfc.nasa.gov>, acessado em agosto de 2013.

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

OLIVEIRA, M. B. L., SANTOS, A. J. B., MANZI, A. O., ALVALÁ, R. C. S., CORREIA, M. F., MOURA, M. S. B. Trocas de energia e fluxo de carbono entre a vegetação de Caatinga

e atmosfera no Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.21, n.3b, p. 378-386, 2006.

OLIVEIRA, L. M. M. ; MONTENEGRO, S. M. G. L. ; ANTONINO, A. C. D. ; SILVA, B.B. da ; MACHADO, C.C.C. ; GALVÍNCIO, J. D. . Análise quantitativa de parâmetros biofísicos de bacia hidrográfica, obtidos por sensoriamento remoto.. Pesquisa Agropecuária Brasileira (1977. Imprensa) **JCR**, v. 47, p. 1209-1217, 2012.

OLIVEIRA, T.H. de ; GALVÍNCIO, J. D. ; P., R.M.M. ; SILVA, B.B. da . Uso e cobertura do solo e seus efeitos na distribuição da temperatura de superfície em área urbana. Revista Brasileira de Geografia Física **JCR**, v. 6, p. 1598-1616, 2013.

PAIVA, C. M. **Estimativa do balanço de energia e da temperatura da superfície via satélite NOAA-AVHRR**. Rio de Janeiro: COPPE-UFRJ, 2005. 235p. Tese Doutorado

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.

PEREIRA, A. R., ANGELOCCI, L. R., SENTELHAS, P. C. Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas. Guaíba, RS, **Livraria e Editora Ltda**, p.478, 2002.

ROERINK,G. J., SU, Z., MENENTI,M.S-SEBI: a simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance.**Physics and Chemistry of the Earth**, v.25, n.2, p.147-157,2000.

SALOMONSON, V.V.; TOLL, D.L. Execution phase (C/D) spectral band characteristics of the EOS Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS-N) facility instrument.**Advances in Space Research**, v.2, n.3, p.231-236, 1990.

SANTOS, C. A., SILVA, B. B. Estimativa da evapotranspiração da bananeira em região semi-árida através do algoritmo S-SEBI. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.16, p.9-20, 2008.

SANTOS, C. A.C. dos ; SILVA, B. B. da ; RAO, T. V. R. ; NEALE, Christopher Michael Usher . Energy balance measurements over a banana orchard in the semiarid region in the

Northeast of Brazil. Pesquisa Agropecuária Brasileira (1977. Impressa) **JCR**, v. 44, p. 1365-1376, 2009.

SANTOS, C. A. C., SILVA, B. B. DA;RAO, T. V. R.; SATYAMURTI, P.; MANZI, A. O. Downward longwave radiation estimates for clear-sky conditions over Northeast Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.26, n.3, p.443 – 450, 2011.

SENAY, G. B; BUDDLE, M. E.; VERDIN, J. P. Enhancing the Simplified Surface Energy Balance (SSEB) approach for estimating landscape ET: Validation with the METRIC model. **Agricultural Water Management**, v.98, p.606-618, 2011.

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

_____, LOPES, G. M., AZEVEDO, P. V. de. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 – TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.20, n.2, 243-252, 2005.

_____, LOPES, G. M., AZEVEDO, P. V. de. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 – TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.20, n.2, 243-252, 2005.

_____, BEZERRA, M. V. C. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 14, n. 2, p. 174-186, 2006.

_____, FERREIRA, J. A., RAO, T. V. R., SILVA, V. P. R. da. Crop water stress index and water-use efficiency for melon (cucumis melo l.) on different irrigation regimes. **Agricultural Journal**, v.2, p.31-37, 2007.

_____, MENDONÇA, R. R., SILVA, S. T. A., BEZERRA, B. G. Obtenção do albedo e IVDN em áreas heterogêneas do estado do Ceará com imagens. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, RN, p.475-482, 2009.

_____; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C. Balanço de radiação no perímetro irrigado São Gonçalo – PB mediante imagens orbitais. **Revista Caatinga**, v.24, n.3, p.145-152, 2011.

_____; Braga, A. C. ; BRAGA, C. C. ; OLIVEIRA, L. M. M. ; GALVÍNCIO, J. D. ; M., S. M. G. L. . Evapotranspiração e estimativa da água consumida em perímetro irrigado do semiárido brasileiro por sensoriamento remoto.. Pesquisa Agropecuária Brasileira (1977. Impressa) **JCR**, v. 47, p. 1218-1226, 2012.

_____.; MACHADO, C.C.C.; OLIVEIRA, L.M.M.; MOURA, M.S.B. Determinação por sensoriamento remoto da produtividade primária bruta do perímetro irrigado São Gonçalo-PB. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.1, p.57-64, 2013.

SILVA, V. P. R., AZEVEDO, P. V., _____. Seasonal patterns of the energy balance components in a mango (*Mangifera indica* L.) orchard grown in Northeast Brazil. **Agricultural Journal**, v.1, n.1, p.18-23, 2006.

SILVA, L. G. DA., GALVINCIO, J. D. Comparative Analysis of Changes in NDVI and SAVI in PELD - 22 - Petrolina - PE, in the First Decade of the XXI Century. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.5, n.6, 2012.

SOBRINO, J. A., GÓMEZ, M., JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C., OLIOSO, A., CHEHBOUNI, G.(2005). A simple algorithm to estimate evapotranspiration from DAIS data:Application

TASUMI, M. Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery. Logan: The University of Idaho, 2003. 357p. PhD Dissertation.

TEICHRIEB, C. A, ZIMERMANN, H. R., MORAES, O. L. L., ACEVEDO, O. Análise do balanço de energia em duas torres micrometeorológicas do Pampa 07. *Ciência e Natura*, Volume Especial - V **Workshop Brasileiro de Micrometeorologia**, p. 149-152, 2007.

TEIXEIRA, A. H. DE C. ; W.G.M. BASTIAANSEN ; MOURA, M. S. B. ; [SOARES, J. M.](#); AHMAD, M UD D; BOS, M. G. Energy and Water Balance Measurements for Water Productivity Analysis in Irrigated Mango Trees, Northeast Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, p. 1524-1537, 2008.

_____, BASTIAANSEN, W. G. M., AHMAD, 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, 2009.

SIMS, D. A.; RAHMAN, A. F.; CORDOVA, V. D.; EL-MASRI, B. Z.; BALDOCCHI, D. D. et al. A new model of gross primary productivity for North American ecosystems based solely on the enhanced vegetation index and land surface temperature from MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v.112, n.4, p.1633-1646, 2008.

THORNTHWAITE, C. W., MATHER, J.R., The water balance. Centerton, N J: Drexel Institute of technology – laboratory of climatology. 104 p. **Publications in climatology**, v.8, n.1, 1944.

TODD, R. W., EVETT, S. R., HOWELL, T. A. The Bowen ration-energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfafa evaluated in a semi-arid and advective environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.103, p.335-348, 2000.

TREZZA, R. **Evapotranspiration using a satellite-based surface energy balance with Standardized ground control**. Logan: Utah State University, 2002. 247f. PhD Dissertation.

TURNER, D.P.; RITTS, W.D.; MAOSHENG, Z.; KURC, S.A.; DUNN, A.L.; WOFSY, S.C.; SMALL, E.E.; RUNNING, S.W. Assessing interannual variation in MODIS-based estimates of gross primary production. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.44, n.7, p.1899-1907, 2006.

VAREJÃO-SILVA, M. A., BRAGA, C. C., SILVA, B. B. da. Atlas climatológico do Estado da Paraíba. Relatório Técnico, 599, 1985.

WU, C.; NIU, Z.; TANG, Q.; HUANG, W.; RIVARD, B.; FENG, J. Remote estimation of gross primary production in wheat using chlorophyll-related vegetation indices. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.149, p.1015–1021, 2009.

XIAO, X. M.; ZHANG, Q. Y.; BRASWELL, B.; URBANSKI, S.; BOLES, S.; WOFSY, S.; MOORE, B.; OJIMA, D. Modeling gross primary production of temperate deciduous

broadleaf forest using satellite images and climate data. **Remote Sensing of Environment**, v.91, n.2, p.256-270, 2004.

ZHAO, M.; HEINSCH, F. A.; NEMANI, R. R.; RUNNING, S. W. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. **Remote Sensing of Environment**, v.95, P.164–176, 2005.

ZWART, S. J.; BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL for detecting spatial variation of water productivity and scope for improvement in eight irrigated wheat systems. **Agricultural Water Management**, v. 89, 287-296 p., 2007.