

MAPEAMENTO DO ALBEDO DE ÁREAS HETEROGÊNEAS DO ESTADO DO CEARÁ COM IMAGENS TM - LANDSAT 5

Bernardo Barbosa da SILVA¹

Rosimary Ramos de Oliveira MENDONÇA¹

Saulo Tasso Araujo da SILVA¹

Rafael da Costa FERREIRA¹

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo a obtenção do albedo da superfície mediante imagens espectrais do TM - Landsat 5 e alguns dados de estação meteorológica na área de estudo, localizada no estado do Ceará, envolvendo o município de Quixeré (5°04'27"S, 37°59'19"W), o Distrito Irrigado Jaguaribe/Apodi - DIJA, outras áreas irrigadas e vegetação nativa. Foram utilizadas seis imagens TM - Landsat 5 (dias 24 de outubro de 2005, 28 de janeiro, 23 de julho, 8 e 24 de agosto do ano de 2006 e 28 de setembro de 2007) e empregados procedimentos do Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) e Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) na obtenção do albedo superficial. Dados de um experimento de campo, conduzido no período de agosto de 2005 a setembro de 2006 em pomar de bananeiras, foram utilizados para validação do albedo obtido com o SEBAL/METRIC. Avaliou-se o impacto da correção atmosférica no albedo da área de estudo, com base no teste de Student. O albedo calculado pelo METRIC apresentou grande concordância com as medições de superfície, com erro padrão da estimativa igual a 0,01. Foi constatado haver diferença significativa entre o albedo quando efetivada a correção atmosférica banda a banda, com o método que considera a correção em todo o domínio da radiação solar, em seis diferentes alvos da área estudada.

Palavras-chave: correção atmosférica, SEBAL, METRIC, radiância.

ABSTRACT

The main objective of this study was the determination of the surface albedo based on spectral IMAGES of TM - Landsat 5 and some data obtained in a weather station within the study area, located in Ceará State, comprising the city of Quixeré (5 ° 04'27 "S, 37 ° 59'19" W), the DIJA project, and irrigated and native vegetation areas. Six TM - Landsat 5 images (24th October 2005, 28th January, 23th July, 8th and 24th August 2006, and 28th September 2007) were used. The Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) and Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration - METRIC were used for obtaining the surface albedo. Data from a field experiment, conducted from August 2005 to September 2006, at Frutacor Farm, were used to validate the albedo. The impact of atmospheric correction in the albedo values was evaluated with the Student's test. The albedo calculated by METRIC method showed great agreement with measurements of surface, with an estimating standard error equal to 0.01. It was found a significant difference between the albedo obtained from atmospheric correction for each spectral

¹ Universidade Federal de Campina Grande - Departamento de Ciências Atmosféricas. Av. Aprígio Veloso, 822. Bairro Universitário. 58109-970 Campina Grande, PB. E-mail: bernardo@dca.ufcg.edu.br

band, when compared to other method that consider the atmospheric correction in the solar radiation spectrum, for six selected areas with different types of vegetation cover.

Key words: atmospherical correction, SEBAL, METRIC, radiance.

1. INTRODUÇÃO

O albedo da superfície é um parâmetro muito importante, pois o seu monitoramento global possibilita detectar alterações que venham a ocorrer em diversos biomas do nosso planeta, resultantes de processos naturais e/ou antropogênicos. Por essa razão, em alguns programas globais têm sido efetivadas a geração de imagens de satélite que propiciam a determinação do albedo e diferentes índices de vegetação.

Em estudos ambientais envolvendo sensoriamento remoto é necessária a utilização de algoritmos que visem estimar elementos da superfície terrestre via imagens de satélites. Dentre os algoritmos existentes tem se destacado o SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), proposto por Bastiaanssen (1995) e que proporciona a obtenção das diferentes componentes dos balanços de radiação e energia. O SEBAL tem sido validado em diferentes países, com dados de campanhas experimentais em áreas irrigadas e bacias hidrográficas. Um aprimoramento importante do SEBAL resultou no Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration - METRIC, apresentado em detalhe em Allen et al. (2007) e que vem sendo aplicado em superfícies heterogêneas e áreas montanhosas. Nesse algoritmo, efetua-se correção atmosférica em cada uma das bandas espectrais do TM - Landsat 5 que são combinadas para obtenção do albedo da superfície. Portanto, é diferente do modo encontrado pelo SEBAL, que é obtido através de simples correção atmosférica do albedo do topo da atmosfera.

Existem vários algoritmos destinados ao cálculo do albedo superficial, mediante medições realizadas com o AVHRR-NOAA. Um dos mais conhecidos foi proposto por Wydick et al. (1987), que relacionaram as refletâncias espectrais do AVHRR, medidas no topo da atmosfera, com o albedo superficial. Outro modelo muito utilizado é o proposto por Hucek e Jacobowitz (1995) e, mais recentemente, Liang et al. (2002) obtiveram, para vários sistemas (AVHRR, MODIS, ETM+ e outros), equações de transformação da refletância de diferentes bandas espectrais em albedo superficial. Todas essas parametrizações aplicam-se às refletâncias espectrais à superfície, quando feitas as devidas correções atmosféricas. Antunes et al. (2003) também efetivaram essas correções a imagens TM - Landsat 5 e ETM⁺ - Landsat 7 utilizando o modelo 6S RTM e obtiveram em áreas vegetadas diminuição da refletância corrigida para as bandas 1, 2 e 3 e aumento as bandas 4, 5 e 7. Tasumi et al. (2003) obtiveram para imagens TM - Landsat 5 cerca de 25% na diferença entre o albedo determinado utilizando o modelo MODTRAN e o albedo

determinado pela metodologia do SEBAL. Já Weligepolage (2005) utilizou os algoritmos SEBAL e S-SEBI com o sensor ASTER e concluiu que o albedo estimado através da refletância com correção atmosférica caracteriza bem melhor os alvos estudados. Souza (2007) compararam o albedo da superfície com correção atmosférica segundo procedimentos propostos por Allen *et al.* (2002) e Tasumi (2003), utilizando imagem Landsat 7 - ETM⁺ para áreas irrigadas e de vegetação nativa no município de Petrolina - PE, e concluíram que o método de correção de Allen *et al.* (2002), com base na altitude de cada pixel da imagem, apresentou resultados mais próximos aos observados em os pomares irrigados naquela região.

Em virtude da importância ambiental do albedo e da precisão de sua determinação, o presente estudo objetiva avaliar o impacto da correção atmosférica no albedo mediante uso de duas metodologias, com imagens TM - Landsat 5. As mesmas são práticas e têm sido testados em diferentes condições atmosféricas, com resultados muito consistentes e estão sendo testadas no ambiente semi-árido do Nordeste brasileiro.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de Estudo

A área de estudo (Fig. 1) compreende parte da bacia hidrográfica do Baixo Jaguaribe, formada pelo Distrito Irrigado Apodi-Jaguaribe - DIJA, áreas de vegetação nativa e diversos pomares irrigados com bananeiras, mamoeiros e meloeiro, principalmente, localizados no município de Quixeré (5°04'27"S; 37°59'19"W; 130m), estado do Ceará. Na Figura 1 está representada a área de estudo, com destaque para Fazenda Frutacor, onde foi instalada uma torre micrometeorológica, o perímetro irrigado, denominado de Distrito de Irrigação Jaguaribe-Apodi (DIJA) e os seis alvos selecionados para detalhamento do estudo: (A₁) pomar de bananas irrigadas (Fazenda Frutacor), (A₂) pivô central (DIJA), (A₃) cultivo de melão irrigado, (A₄) vegetação espessa, (A₅) culturas irrigadas e (A₆) vegetação densa (Caatinga).

Segundo Andrade *et al.* (2004), o clima do município de Quixeré é tropical quente semi-árido e, de acordo com a classificação climática de Köppen, é do tipo BSw'h'. A temperatura média anual é de 28,5°C, sendo de 22,5°C e 35,3 °C as médias anuais das temperaturas mínima e máxima, respectivamente. A estação chuvosa situa-se entre os meses de fevereiro a maio, com média pluviométrica anual de 877,7mm e umidade relativa média anual de 62%.

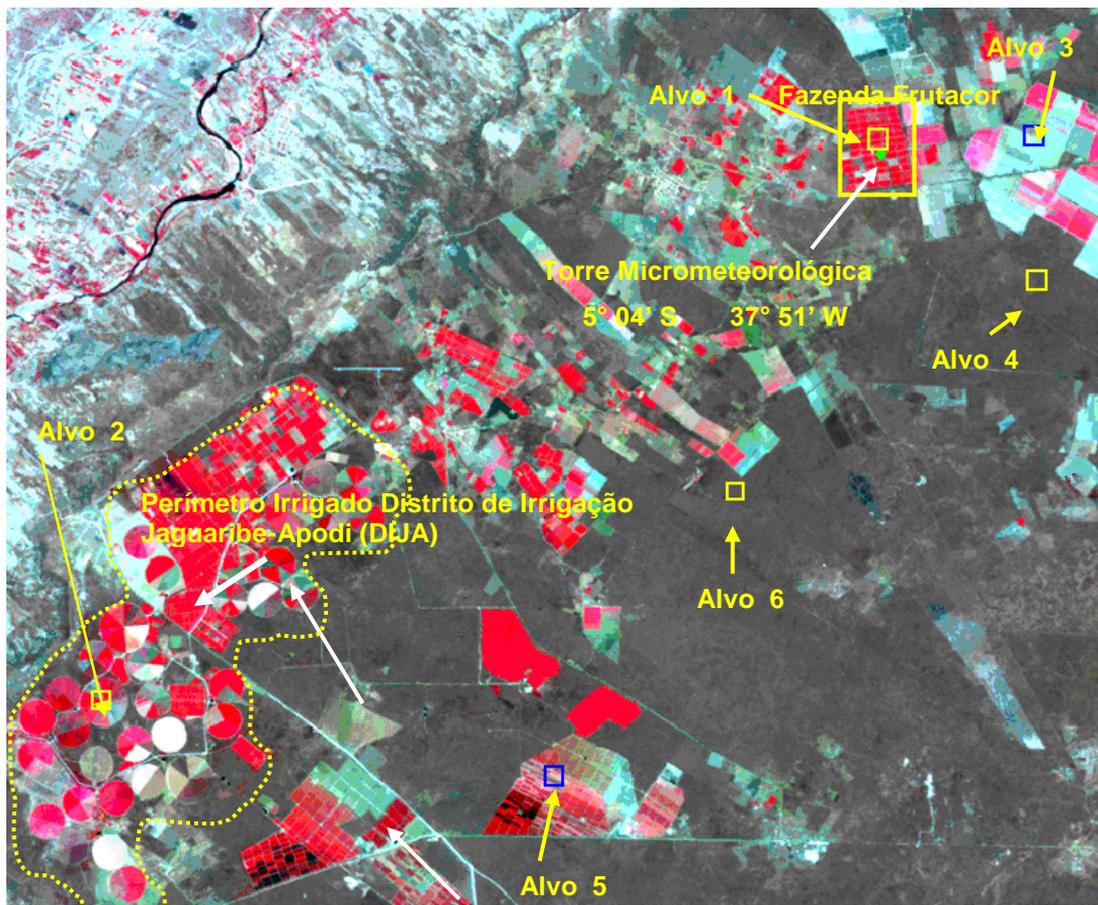


Figura 1. Área de estudo na combinação RGB - 432 do TM - Landsat 5 com destaque para a Fazenda Frutacor, a localização da torre micrometeorológica, o Perímetro Irrigado Distrito de Irrigação Jaguaribe-Apodi (DIJA) e os seis alvos selecionados para estudo no dia 8 de agosto de 2006.

Os solos encontrados na região são dos tipos: aluvial, cambissolo e vertissolo. O relevo é considerado plano, apresentando declividade inferior a 2% em pequenas áreas ligeiramente deprimidas com variação nas condições da morfologia. O suprimento hídrico do perímetro irrigado é assegurado pelo Rio Jaguaribe, perenizado pelo Açude Público Federal de Orós, com capacidade de $2,1 \times 10^6 \text{ m}^3$ (BEZERRA, 2006).

2.2. Dados obtidos

Os dados necessários à obtenção e validação do albedo foram obtidos em experimento de campo em pomar de bananeiras da fazenda Frutacor, município de Quixeré - CE. Foram efetuadas medidas da radiação solar incidente e da radiação solar refletida com dois piranômetros modelo CM3 (Keep Zonnen, The Netherlands). A temperatura e umidade relativa do ar foram medidas com termohigrômetro modelo HMP24C e pressão atmosférica com barômetro analógico modelo CS105 (Campbell Scientific, Logan, USA). Todos esses dados foram coletados em sistema de aquisição de dados (CR23X da

Campbell Scientific, Logan, USA) programado para coleta a cada 5 segundo e extração de médias a cada 20 minutos. Essas medições foram utilizadas para alimentar os modelos de correção atmosférica e validação do albedo.

2.3. Obtenção e tratamento das imagens

Foram utilizadas seis imagens TM - Landsat 5 da área de estudo, correspondentes à órbita 216 e ponto 64, cujas informações referentes ao dia, hora, ângulo de elevação e distância relativa Terra-Sol, as quais constam da Tabela 1.

Tabela 1. Data das imagens TM - Landsat 5, dia sequencial do ano – DAS, horário da geração das imagens, quadrado da distância relativa Terra-Sol - dr e ângulos de elevação – E e zenital solar - Z.

Data da imagem	DSA	Horário		dr	Ângulos (°)	
		UTM	Local		E	Z
24/out/2005	297	12:29:24	9:29:24	1,0129	63,79	26,21
28/jan/2006	28	12:31:12	9:31:12	1,0292	55,98	34,02
23/jul/2006	204	12:34:12	9:34:12	0,9692	50,63	39,37
8/ago/2006	220	12:34:48	9:34:48	0,9740	53,09	36,90
24/ago/2006	236	12:34:48	9:34:48	0,9800	53,42	33,90
28/set/2007	271	12:29:34	9:29:34	0,9884	63,07	26,93

A seguir são descritas as diferentes etapas do processamento das imagens TM - Landsat 5, objetivando a obtenção do albedo da superfície com dois diferentes métodos (Allen e METRIC).

2.3.1. Radiância espectral

É o processo de calibração radiométrica, no qual o Número Digital - *ND* de cada pixel da imagem original é convertido em radiância espectral monocromática - $L_{\lambda,b}$ ($W.m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$), segundo expressão proposta por Markham & Baker (1987):

$$L_{\lambda,b} = a_b + \left(\frac{b_b - a_b}{255} \right) \cdot ND \quad (1)$$

onde a_b e b_b são as radiâncias espectrais mínima e máxima, respectivamente ($W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$) das diferentes bandas do TM - Landsat 5 (Tab. 2).

2.3.2. Reflectância espectral planetária

A refletância espectral planetária é dada pela razão entre a integração hemisférica da radiância monocromática e a irradiância solar monocromática incidente numa superfície

horizontal, sendo obtida através da expressão (BASTIAANSSEN, 1995; ALLEN *et al.*, 2002; SILVA *et al.*, 2005):

$$\rho_{\lambda,b} = \frac{\pi L_{\lambda,b}}{ESUN_{\lambda} \cdot \cos Z \cdot d_r} \quad (2)$$

onde $L_{\lambda,b}$ é a radiância espectral ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$); $ESUN_{\lambda}$ é a irradiância solar espectral relativa a banda b do TM, no topo da atmosfera ($W m^{-2} \mu m^{-1}$) (Tab. 1); Z é o ângulo zenital do Sol e d_r é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol.

Tabela 2. Bandas e faixas espectrais correspondentes ao TM - Landsat 5, coeficientes de calibração mínimo – a e máximo – b, irradiância solar espectral no topo da atmosfera ($ESUN_{\lambda}$) e coeficientes das diferentes bandas usados no cômputo do albedo.

Bandas	Faixa espectral (μm)	Coeficientes de calibração ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$)		$ESUN_{\lambda}$ ($W m^{-2} \mu m^{-1}$)	$w_{\lambda i}$
		a	b		
1	0,45 – 0,52	– 1,52	193,0	1957	0,293
2	0,52 – 0,60	– 2,82	365,0	1826	0,274
3	0,63 – 0,69	– 1,17	264,0	1554	0,233
4	0,76 – 0,90	– 1,51	221,0	1036	0,157
5	1,55 – 1,75	– 0,37	30,2	215,0	0,033
6	10,4 – 12,5	1,2378	15,303	---	---
7	2,08 – 2,35	– 0,15	16,5	80,67	0,011

Fonte: Chander & Markham (2003).

2.3.3. Albedo planetário

Após a obtenção da refletância espectral planetária de cada uma das seis bandas reflectivas do TM - Landsat 5, foi obtido o albedo no topo da atmosfera – α_{plan} ; portanto, sem qualquer correção atmosférica e segundo a seguinte equação (MORSE *et al.*, 2000; TREZZA, 2002; TASUMI, 2003; ALLEN *et al.*, 2007):

$$\alpha_{plan} = w_{\lambda 1} \cdot \rho_{\lambda 1} + w_{\lambda 2} \cdot \rho_{\lambda 2} + w_{\lambda 3} \cdot \rho_{\lambda 3} + w_{\lambda 4} \cdot \rho_{\lambda 4} + w_{\lambda 5} \cdot \rho_{\lambda 5} + w_{\lambda 7} \cdot \rho_{\lambda 7} \quad (3)$$

em que $\rho_{\lambda b}$ representa a reflectância planetária da banda b e $w_{\lambda b}$ os pesos de cada banda na composição do albedo planetário, sendo igual a razão entre o $ESUN_{\lambda}$ e o somatório de todos os $ESUN_{\lambda}$.

2.3.4. Albedo da Superfície

O albedo da superfície, ou albedo corrigido os efeitos atmosféricos, foi obtido segundo dois procedimentos descritos em seguida.

2.3.4.1. Método Allen

Esse método de cálculo do albedo da superfície - α_{sup} se baseou na equação proposta de Bastiaanssen (2000), qual seja:

$$\alpha_{sup} = \frac{\alpha_{plan} - \alpha_{atm}}{\tau_{sw}^2} \quad (4)$$

onde α_{plan} representa o albedo planetário; α_{atm} é a porção da radiação solar refletida pela atmosfera (utilizou-se o valor de 0,03, conforme BASTIAANSEEN, 2000); e τ_{sw} é a transmissividade atmosférica para a radiação solar em condições de céu claro pode ser obtida por (ALLEN *et al.*, 2002):

$$\tau_{sw} = 0,75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot MED \quad (5)$$

em que MED representa a altitude (*m*) de cada pixel, extraída do Modelo de Elevação Digital.

2.3.4.2. Método METRIC

No METRIC a refletância espectral à superfície - $\rho_{sup,b}$ é corrigida banda a banda, diferentemente das versões anteriores do SEBAL, conforme expressão (ALLEN *et al.*, 2007; TASUMI, 2003):

$$\rho_{sup,b} = \frac{\rho_{\lambda,b} - \rho_{atm,b}}{\tau_{inc,b} \cdot \tau_{asc,b}} \quad (6)$$

onde $\rho_{\lambda,b}$ é a refletividade planetária (no topo da atmosfera e calculada pela Eq. 2); $\rho_{atm,b}$ é a refletância atmosférica, obtida mediante Equação 9, que será detalhada mais adiante; $\tau_{inc,b}$ é a transmissividade atmosférica relativa à radiação solar incidente na superfície e $\tau_{asc,b}$ é a transmissividade relativa à radiação refletida pela superfície, obtidos para cada banda *b* (1, 2, 3, 4, 5 e 7 do TM - Landsat 5), individualmente.

A transmissividade incidente ($\tau_{inc,b}$) foi obtida por expressão proposta em Tasumi *et al.* (2006):

$$\tau_{inc,b} = C_1 \exp \left[\frac{C_2 \cdot P_{atm}}{k_t \cdot \cos Z} - \frac{C_3 \cdot W + C_4}{\cos Z} \right] + C_5 \quad (7)$$

onde C_1 , C_2 , C_3 , C_4 e C_5 são coeficientes providos de modelo de transferência radiativa para cada banda espectral *b*, constantes na Tabela 3; P_{atm} é a pressão atmosférica média (KPa); W é a água precipitável na atmosfera (mm); Z é o ângulo zenital solar e k_t é o coeficiente de turbidez atmosférica.

A transmissividade ascendente ($\tau_{asc,b}$) foi obtida pela seguinte expressão:

$$\tau_{asc,b} = C_1 \exp \left[\frac{C_2 \cdot P_{atm}}{k_t \cdot \cos \eta} - \frac{C_3 \cdot W + C_4}{\cos \eta} \right] + C_5 \quad (8)$$

em que η representa o ângulo zenital do sensor TM (próximo de 0 e, portanto, $\cos \eta = 1$).

Os parâmetros de C_1 a C_5 foram determinados por Tasumi *et al.* (2006), mediante a utilização do modelo de transferência radiativa SMARTS2 (*Simple Model of Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine*) e modelo de regressão simples, os quais estão representados na Tabela 3.

Tabela 3. Coeficientes de calibração providos de modelo de transferência radiativa para imagens TM - Landsat 5.

Bandas	Coeficientes de calibração						W_b
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	$C_{\lambda,b}$	
1	0,987	-0,00071	0,000036	0,0880	0,0789	0,640	0,254
2	2,319	-0,00016	0,000105	0,0437	-1,2697	0,310	0,149
3	0,951	-0,00033	0,00028	0,0875	0,1014	0,286	0,147
4	0,375	-0,00048	0,005018	0,1355	0,6621	0,189	0,311
5	0,234	-0,00101	0,004336	0,0560	0,7757	0,274	0,103
7	0,365	-1,00097	0,004296	0,0155	0,639	-0,186	0,036

Fonte: Tasumi *et al.* (2006) e Allen *et al.* (2007).

Em seguida, efetivou-se o cálculo da reflectância atmosférica ($\rho_{atm,b}$) relativa a cada faixa espectral do TM, mediante equação (ALLEN *et al.*, 2007; TASUMI *et al.*, 2006):

$$\rho_{atm,b} = C_{\lambda,b} (1 - \tau_{inc,b}) \quad (9)$$

em que $C_{\lambda,b}$ é um parâmetro determinado para cada banda do sensor TM, constante na Tabela 3. O albedo da superfície, corrigido segundo o METRIC, foi computado através da combinação linear expressa pela Equação 3, com as reflectâncias monocromáticas obtidas pela Equação 6 e pesos W_b constantes na Tabela 3 (TASUMI *et al.*, 2006; ALLEN *et al.*, 2007).

2.3.5. Teste de hipótese e significância

Após a obtenção do albedo superficial procura-se verificar se houve diferença significativa entre os métodos de correção atmosférica empregados. Para tanto, foi aplicado o teste de Student a diferença de médias. Selecionaram-se seis diferentes alvos e em cada um deles obteve-se a média e desvio-padrão do albedo, que foram usados no referido teste.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Validação dos métodos de correção do albedo da superfície

Na Tabela 4 estão representados os valores do albedo obtido segundo as duas metodologias. Sistemáticamente, o Método METRIC apresentou a maior acurácia e, portanto, as menores diferenças com as medições piranométricas, resultando em Erro Padrão da Estimativa - EPE de apenas 0,010, o que evidencia a precisão da técnica. É importante destacar que as condições atmosféricas que afetam a transmissividade da atmosfera podem mudar até mesmo ao longo de um dia e que as correções efetivadas consideram apenas a contribuição do vapor d'água atmosférico e turbidez provocada por aerossóis. Nesse sentido, as diferenças existentes entre o METRIC e as medições, embora pequenas, devem resultar da existência de alguma turbidez e outros efeitos não contemplados na técnica. Quanto ao Método de Allen, as diferenças são maiores que as do METRIC, mas não chegam a ser expressivas, uma vez que o EPE foi de apenas 0,0187. Portanto, quando não for possível o uso da correção banda a banda, a utilização apenas da altitude, conforme proposto no Método de Allen, pode resultar em estimativas com precisão aceitável em muitas aplicações. Ademais, uma vantagem no uso dessa técnica de correção, é que a mesma pode ser aplicada com auxílio de Modelo de Elevação Digital – MED, dispensando medições de umidade atmosférica, temperatura do ar e pressão atmosférica.

Tabela 4. Albedo obtido com os métodos de correção atmosférica de Allen e METRIC no pomar de bananeiras na Fazenda Frutacor, e albedo medido com piranômetros num mesmo talhão do pomar.

Datas	Métodos de correção		Albedo medido
	Allen	METRIC	
24/outubro/2005	0,184	0,176	0,164
28/janeiro/2006	0,173	0,166	0,160
23/julho/2006	0,172	0,169	0,157
08/agosto/2006	0,171	0,165	0,162
24/agosto/2006	0,176	0,169	0,162
28/setembro/2007	0,178	0,164	0,160
Erro Padrão	0,0187	0,0100	–

3.2. Mapeamento do albedo da superfície

Uma vez identificado o método de correção atmosférica de maior acurácia, foram elaborados mapas do albedo derivados das seis imagens do TM - Landsat 5 com o Método METRIC (Fig. 2a-f). Como pode ser observado na Figura 2a, predominam na área de estudo duas classes de albedo: de 14 - 16% e 16 - 18 %; entretanto, no canto superior

esquerdo do mapa percebe-se a predominância de classes de albedo entre 22 e 26%. Pode-se notar que no DIJA se destacam os pivôs centrais, compreendendo com maior cobertura as classes de 16 - 22% e de 22 - 24%, aparecendo também em menor proporção à classe de albedo entre 26 - 30%. Na Fazenda Frutacor há uma predominância da classe de albedo variando de 16 a 18%, enquanto que no plantio de melão irrigado predomina a classe de albedo de 22 - 24%. O leito do rio Jaguaribe evidencia a presença da água, com albedo em geral inferior aos 10% e a presença de albedo com valores superiores a 28%, provavelmente associada à presença de bancos areia.

A Figura 2b, do dia 28 de janeiro de 2006, apresenta predominância da classe de albedo de 12 - 14%, mais concentrado no sudeste da imagem. O DIJA apresenta uma redução na variação do albedo em relação à imagem anterior, ocorrendo três classes de albedo variando de 16 - 22%. O plantio de melão apresenta duas classes de albedo, com variação de 10 - 12% e de 16 - 20%. Mais uma vez não fica evidenciada grande diferenciação entre as áreas irrigadas e de sequeiro/vegetação nativa. Já na Figura 2c, de 23 de julho de 2006, nota-se uma ampliação das áreas com albedo menor que 10%, possivelmente associado ao regime pluvial local, com a formação de áreas com presença de água (barreiros e baixios alagados), o que diminui ainda mais a diferenciação entre áreas irrigadas e vegetação nativa e a faixa de variação predominante em quase toda a área é de 12 - 14%. Neste dia, já nota-se mais claramente o contorno da Fazenda Frutacor, no canto superior direito do mapa, com albedo predominantemente entre duas faixas, variando de 14 - 18%; essa variação também predomina na área do plantio de melão irrigado e no DIJA.

As Figuras 2d e 2e, referentes a 8 e 24 de agosto de 2006, apresentam padrões muito semelhantes, até porque foram obtidos em datas muito próximas. Nas duas imagens predominam albedo entre 10 - 12 %, seguida da faixa de 14 - 18%, que compreende principalmente as áreas com agricultura irrigada. No entanto, observa-se uma diminuição das áreas com albedo menor que 10% na Figura 2e. Alguns pivôs pertencentes ao DIJA apresentam para o dia 8 de agosto albedo variando de 22 - 24% e para o dia 24 de agosto observa-se um aumento do albedo, que passa a variar entre 24 e 26%.

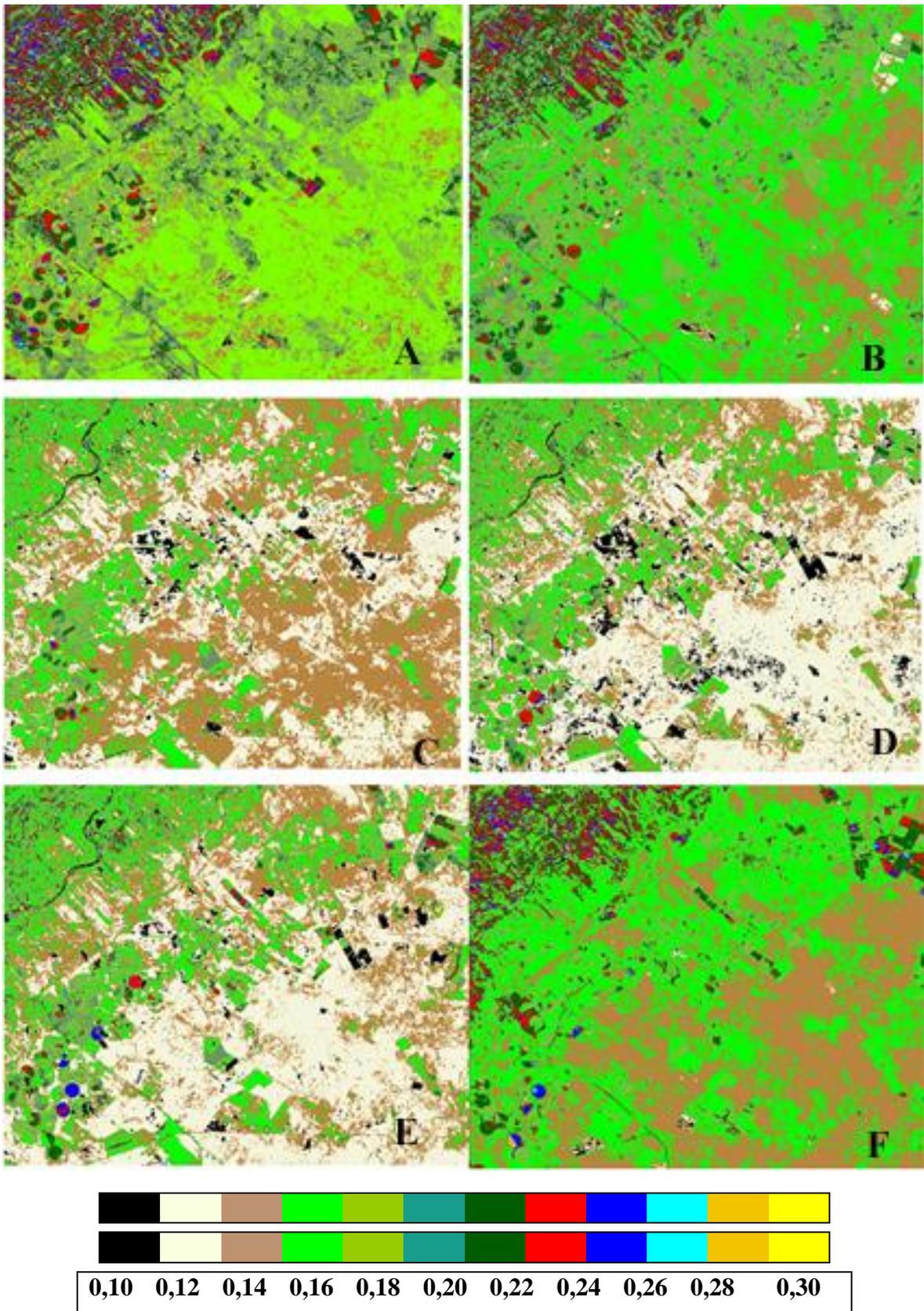


Figura 2. Mapas de albedo pelo método METRIC para os dias: (a) 24 de outubro de 2005 e (b) 28 de janeiro de 2006, (c) 23 de julho de 2006, (d) 08 de agosto de 2006, (e) 24 de agosto de 2006 e (f) 28 de setembro de 2007.

Para 28 de setembro de 2007 (Fig. 2f) há predominância de duas classes de albedo, de 12 - 14% e de 14 - 16%. A plantação de melão apresenta muita variação de albedo, compreendendo valores das classes entre 14 - 18%, 20 - 22% e de 22 a 26%. Os resultados obtidos mostram grande semelhança com os de Bezerra (2006), que obteve albedo superficial para a mesma área de estudo, através dos métodos Allen e Idaho. Dantas (2008) encontrou para os meses de julho e agosto de 2006, valores entre 4% e 22% em quase toda área deste estudo, mas usando o AVHRR - NOAA 18. Bezerra (2004) obteve valores de 7 a 14% para reservatórios de água, para os pivôs irrigados 22% e para caatinga 22%. Já Martins (2000), encontrou albedo entre 12 e 13% para caatinga, para a mesma região de estudo, também corroborando Silva *et al.* (2005a,b) para áreas irrigadas com frutíferas e de 20 a 30 % para Caatinga, na região do vale do Rio São Francisco (Bahia / Pernambuco). Leitão & Oliveira (2000) obtiveram albedo médio diário de 23,6% para todo o ciclo do amendoim e, em outro estudo, obtiveram os valores de 30,5%, 21,6% e 25,2%, para mata densa, campinarana e campina, respectivamente, em ecossistemas da Floresta Amazônica. Moura (2001), em estudo sobre a goiabeira irrigada na região do submédio São Francisco, obteve albedo médio de 23,25% durante o período produtivo da cultura, enquanto Kustas *et al.* (1990), também com TM - Landsat 5, encontraram para as culturas de trigo, alfafa e algodão albedos de 21%, 23% e 22% respectivamente. Silva *et al.* (2005a) obtiveram em áreas com frutíferas no NEB, albedo entre 15 - 25 %. Os maiores valores observados em áreas com solo mais descoberto foram superiores aos obtidos neste estudo, e a contribuição do solo pode ser o principal causador de diferença tão acentuada. Oke (1987) obteve, estudando deserto, um albedo de até 40%, enquanto que nas áreas correspondentes aos cultivos irrigadas, os valores de albedo encontrados foram em torno de 17% e 16%, confirmando os resultados deste estudo. Em cinturão (dunas de areia) da costa oeste do Sirilanka, Chandrapala & Wimalasuriya (2003) obtiveram albedo de 34 - 36%, em grandes extensões de dunas de areia, com grande estabilidade no período de julho de 1999 a julho de 2000. Aqueles autores constataram que o albedo do mar, nas proximidades da área continental estudada, foi de 5%, próximo aos obtidos no rio Jaguaribe neste estudo; no entanto, Silva *et al.* (2005a) obtiveram para o lago de Sobradinho, albedo na ordem de 11%.

3.3. Albedo dos seis alvos selecionados

Como mencionado antes, foram selecionados seis alvos para avaliar com mais profundidade os valores do albedo e se as diferenças entre as médias do albedo de cada alvo diferem significativamente entre si, usando o teste de Student, com nível de

significância de 0,05. Na Tabela 5 estão representados a média e o desvio padrão do albedo, para cada um dos métodos empregados, além da estatística de Student usada para comparação com os valores críticos, que em virtude das amostras terem tamanho mínimo $N = 210$ pixels resultou em $t_{\text{crítico}}$ igual a 1,645.

Para o alvo 1 (A_1), compreendendo um pomar de bananeiras pertencente a fazenda Frutacor, o albedo apresentou variação de 16,0% (em 8 de agosto de 2006) a 17,7% (em 24 de outubro de 2005), segundo o Método METRIC. O pivô central pertencente ao DIJA, alvo 2 (A_2), apresentou variação de 17,6 a 23,7%, para o Método Allen e de 14,2 a 18,9% para o METRIC. O maior valor obtido ocorreu no mês de janeiro de 2006 e o valor mais baixo no dia 8 de agosto de 2006. Para o alvo 3 (A_3), plantio de melão irrigado, os valores de albedo variaram entre 15,7 e 29,6% para o Método Allen e entre 12,7 e 22,1% para os valores obtidos pelo método METRIC. Os menores valores obtidos estão relacionados à imagem de julho de 2006 e os maiores para o mês de outubro de 2005, seguido do mês de setembro de 2007. Já para o alvo 4 (A_4), os maiores valores de albedos ocorreram nos meses de outubro de 2005 e setembro de 2007, variando de 14 a 18%, e os menores para nos meses de julho e agosto, variando entre 11 e 15% para os métodos de análise. As culturas irrigadas relacionadas ao alvo 5 (A_5) apresentaram albedo com maiores valores no mês de setembro de 2007, variando entre 16 e 21% e o mais baixo em 8 de agosto de 2006, de 12 a 15%. Para o alvo 6 (A_6), Caatinga, o menor valor obtido corresponde a agosto de 2006, entre 12 e 14% e os maiores em setembro de 2007, que variaram entre 14 e 18%.

De modo geral, observa-se que o albedo da superfície obtido pelo Método Allen apresenta valores superiores aos obtidos pelo Método METRIC, sendo este o que apresentou menores valores para todos os dias analisados. Analisando toda a área, os menores valores de albedo superficial encontrado foram registrados para os meses de julho e agosto de 2006, enquanto que os maiores se apresentaram nos meses de outubro de 2005, janeiro de 2006 e setembro de 2007. Essa variação deve estar associada à precipitação da área, pois os meses de ocorrência de chuvas obtiveram menores valores de albedo, enquanto que os meses mais quentes apresentaram valores mais elevados. Em relação aos alvos selecionados, a plantação de melão irrigado (A_3) registrou os maiores valores de albedos (dia 24 de outubro de 2005), provavelmente por apresentar solo sem plantação devido ao período de colheita e os menores valores encontrados relaciona-se a caatinga, alvo 6 para o dia 8 de agosto de 2006, devido ao regime pluvial local.

3.4. Significância das diferenças estatísticas entre os métodos

Através da média e desvio padrão amostral do albedo, obtidos nos seis alvos selecionados (Tab. 5), foi aplicado o teste estatístico de Student, da diferença entre médias amostrais. A Hipótese Nula - H_0 foi a de que as médias foram extraídas de uma mesma população; portanto, usando a estatística de Student calculou-se $t_{\text{calculado}}$ associado aos albedos obtidos pelos métodos Allen x METRIC, para os níveis de significância de 0,01 e 0,05, o que resultou em $t_{\text{crítico}} = 2,33$ e 1,645, respectivamente. Foram utilizadas amostras com um número de pixels superior ou igual a 210. Para o nível de significância $\alpha = 0,01$ constatou-se em todos os seis alvos que em todas as 36 situações houve rejeição da H_0 . Logo, em 100,0% dos casos foi constatado haver diferença significativa entre os métodos de obtenção do albedo. Como a H_0 foi rejeitada ao nível $\alpha = 0,01$, automaticamente está rejeitada ao nível $\alpha = 0,05$ ou qualquer outro nível superior.

4. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que a correção atmosférica afeta significativamente o albedo superficial. Por sua vez, o albedo da superfície obtido mediante o Método METRIC apresentou grande precisão, confirmada por comparação com medidas piranométricas, com Erro Padrão da Estimativa de apenas 0,0100. Portanto, a correção atmosférica banda a banda resulta em melhores estimativas do albedo.

5. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pelo suporte financeiro através do Proc. 474514/2006-4, bolsa de produtividade em pesquisa ao primeiro autor e bolsa de mestrado e/ou doutorado aos demais autores, respectivamente.

Tabela 5. Valores médios do albedo relativos aos alvos selecionados e métodos de cômputo (Allen e METRIC), desvio padrão e o $t_{\text{calculado}}$ para cada caso.

Datas	Métodos	Variação	Alvos					
			1	2	3	4	5	6
24/10/05	Allen	Média	0,193	0,196	0,290	0,173	0,166	0,173
		Desvio Padrão	0,018	0,018	0,015	0,005	0,021	0,004
	METRIC	Média	0,177	0,183	0,221	0,147	0,149	0,147
		Desvio Padrão	0,009	0,016	0,011	0,005	0,017	0,003
	$t_{\text{calculado}}$		11,93	8,10	58,06	55,15	10,07	78,00
28/01/06	Allen	Média	0,185	0,237	0,195	0,168	0,176	0,175
		Desvio Padrão	0,012	0,014	0,032	0,005	0,032	0,007
	METRIC	Média	0,169	0,189	0,150	0,139	0,147	0,142
		Desvio Padrão	0,007	0,014	0,030	0,005	0,028	0,005
	$t_{\text{calculado}}$		17,08	36,37	14,87	61,38	10,91	57,54
23/07/06	Allen	Média	0,169	0,199	0,157	0,137	0,160	0,139
		Desvio Padrão	0,009	0,011	0,025	0,004	0,016	0,004
	METRIC	Média	0,162	0,154	0,127	0,127	0,138	0,135
		Desvio Padrão	0,009	0,022	0,022	0,004	0,014	0,005
	$t_{\text{calculado}}$		8,96	47,49	2,74	27,39	16,03	9,37
8/08/06	Allen	Média	0,168	0,176	0,181	0,136	0,147	0,133
		Desvio Padrão	0,013	0,022	0,026	0,005	0,015	0,005
	METRIC	Média	0,160	0,143	0,155	0,117	0,128	0,123
		Desvio Padrão	0,013	0,015	0,036	0,005	0,012	0,006
	$t_{\text{calculado}}$		6,53	18,59	8,78	40,31	14,84	19,21
24/08/06	Allen	Média	0,173	0,219	0,219	0,153	0,157	0,135
		Desvio Padrão	0,012	0,062	0,026	0,035	0,019	0,005
	METRIC	Média	0,165	0,185	0,190	0,129	0,135	0,120
		Desvio Padrão	0,013	0,040	0,030	0,025	0,014	0,006
	$t_{\text{calculado}}$		6,90	6,91	10,59	8,64	14,44	28,81
28/09/07	Allen	Média	0,202	0,209	0,263	0,182	0,212	0,181
		Desvio Padrão	0,011	0,020	0,028	0,006	0,026	0,003
	METRIC	Média	0,176	0,172	0,200	0,144	0,167	0,145
		Desvio Padrão	0,008	0,008	0,015	0,004	0,019	0,003
	$t_{\text{calculado}}$		28,03	25,77	28,74	81,64	21,65	127,28

4. REFERÊNCIAS

ALLEN, R.; BASTIAANSEN, W.; WATERS, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R. 2002. **Surface energy balance algorithms for land (SEBAL), Idaho implementation - Advanced training and users manual, version 1.0.** 97p.

ALLEN, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R. 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 133, n. 395, p. 380-394.

ANDRADE, E.M.; D'ALMEIDA, D.M.B.A.; MEIRELES, A.C.M.; FILHO, L.C.A.L.; ARRUDA, F.E.R. 2004. Evolução da concentração iônica da solução do solo em áreas irrigadas na Chapada do Apodi, CE. **Revista Ciência Agronômica**, v. 35, n. 1, p. 9-16.

ANTUNES, M.A.H.; FREIRE, R.M.B.; BOTELHO, A.S.; TONIOLLI, L.H. 2003. Correções atmosféricas de imagens de satélites utilizando o Modelo 6S. In: XXI CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, Belo Horizonte, 2003. **Anais... XXI Congresso Brasileiro de Cartografia**.

BASTIAANSSEN, W.G.M. 1995. Regionalization of Surface Flux Densities and Moisture Indicators in Composite Terrain. A Remote Sensing Approach Under Clear Skies in Mediterranean Climates, **Tese**, Wageningen Agricultural University, The Netherlands, 273.

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

BEZERRA, M.V.C. 2004. Balanço de Energia em Áreas Irrigada Utilizando Técnicas de Sensoriamento Remoto. **Dissertação** (Mestrado em Meteorologia), Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB. 108p.

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

CHANDER, G.; MARKHAM, B. 2003. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 11, p. 34-46.

CHANDRAPALA, L.; WIMALASURIYA, M. 2003. Satellite measurements supplemented with meteorological data to operationally estimate evaporation in Sri Lanka. **Agricultural Water Management**, v. 58, p. 89-107.

DANTAS, F.R. 2008. Estudo comparativo de parâmetros da vegetação sobre diferentes alvos utilizando dados do AVHRR e TM. **Dissertação** de Mestrado - UFCG, Campina Grande – PB.

HUCEK, R.; JACOBOWITZ, H. 1995. Impact of scene dependence on AVHRR albedo models. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 12, p. 389-402.

KUSTAS, W.P.; MORAN, M.S.; JACKSON, R.D.; GAY, L.W.; DUELL, L.F.W.; KUNKEL, K.E.; MATTHIAS, A.D. 1990. Instantaneous and daily values of the surface energy balance over agricultural fields using remote sensing and a reference field in as arid environment. **Remote sensing of Environment**, v. 32, p. 125-141.

LIANG, S.; SHUEY, C.J.; RUSS, A.L.; FANG, H.; CHEN, M.; WALTHALL, C.L.; DAUGHTRY, C.S.T.; HUNT JR, R. 2002. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo: II. Validation. **Remote Sensing of Environment**, v. 84, p. 25-41.

LEITÃO, M.M.V.B.R.; OLIVEIRA, G.M.A 2000. Influência da irrigação sobre o albedo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 2, p. 214-218.

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

MARTINS, R.W.A. 2000. Balanço de radiação e energia em área reflorestada com algaroba no Seridó do Rio Grande do Norte. **Dissertação** de Mestrado, Campina Grande – PB: DCA/CCT/UFCG 98p.

MORSE, A.; TASUMI, M.; ALLEN, R.G.; KRAMBER, W.J. 2000. Application of the SEBAL methodology for estimating consumptive use of water and streamflow depletion in the Bear River basin of Idaho through remote sensing. **Relatório**. Department of Water Resources/University of Idaho. 98p.

MOURA, M.S.B. 2001. Fenologia e consumo hídrico da goiabeira (*Psidium guajava* L.) irrigada. **Dissertação** de Mestrado: DCA/CCT/UFPB, Campina Grande. 124p.

OKE, T.R. 1987. **Boundary Layer Climates**. London: Rotledge. 435p.

SILVA, B.B.; LOPES, G.M.; AZEVEDO, P.V. 2005a. Determinação do albedo de áreas irrigadas com base em imagens Landsat 5-TM. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 13, n. 2, p. 11-21.

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

SOUZA, M.C.G. 2007. Obtenção de componentes do balanço de radiação em áreas irrigadas e de vegetação nativa na Chapada do Apodi com imagens Landsat 5 e influência atmosférica. **Dissertação** Meteorologia - Campina Grande - UFCG. Campina Grande, PB.

TASUMI, M. 2003. Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery. **Tese** - University of Idaho (USA). 355p.

TASUMI, M.; TREZZA, R.; ALLEN, R.G.; WRIGHT, J.L.U.S. 2003. Validation Test on the SEBAL model for evapotranspiration via satellite, **ICID Workshop** on Remote Sensing of Evapotranspiration for Large Regions, 17 sep.

TREZZA, R. 2002. Evapotranspiration using a satellite-based surface energy balance with standardized ground control. **Tese**. Utah State University, Logan, Utah. 247p.

WELIGEPOLAGE, K. 2005. **Estimation of spatial and temporal distribution of evapotranspiration bay satellite remote sensing** – A casa study in Hupselse Beek, The Netherlands, 114p.

WYDICK, J.; DAVIES, P.; GRUBER, A. 1987. **Estimation of broadband planetary albedo from operational narrowband satellite measurements**. NOAA Technical Report, NESDIS 27. 32p.