

ESTIMATIVA DA COBERTURA VEGETAL E DO BALANÇO DE RADIAÇÃO DE UMA BACIA NO SEMI-ÁRIDO PARAIBANO POR MEIO DE IMAGENS DO LANDSAT-5 TM

John Elton de Brito Leite Cunha¹ & Iana Alexandra Alves Rufino²

RESUMO

A cobertura vegetal do semi-árido paraibano, em sua maior parte, encontra-se bastante antropizada em decorrência da abertura de áreas para exploração agrícola e principalmente pela exploração de lenha como fonte energética para olarias, panificadoras e uso doméstico. A sub-bacia de São João do Rio do Peixe totalmente inserida na região semi-árida do Nordeste brasileiro é uma destas áreas que sofrem as conseqüências da ocupação humana. Neste contexto este trabalho tem como objetivo observar as regiões mais degradadas desta bacia, utilizando as imagens do satélite Landsat-5 TM e através dos diversos produtos obtidos pelas técnicas de sensoriamento remoto e processamento digital de imagens, tais como índices de vegetação (NDVI, EVI, e IAF), albedo, temperatura de superfície e saldo de radiação. As modificações na cobertura vegetal são apresentadas, identificando-se os principais agentes modificadores da paisagem como a proximidade a corpos hídricos e a implantação de atividades agrícolas.

Palavras chaves: Imagens de satélite, uso da terra e alterações antrópicas, processamento digital de imagens.

ESTIMATION OF VEGETAL COVERAGE OF THE RADIATION BALANCE IN ONE BASIN AT PARAIBA'S SEMI-ARID THROUGH OF LANDSAT-5 TM IMAGES

ABSTRACT

The vegetation of semi-arid areas from state of Paraíba (Brazil) has been widely changed by human uses like agricultural activities and especially the wood exploitation for energy source used by pottery, bakeries and household's uses. The São João do Rio do Peixe basin is a small basin inside of the semi-arid region of northeastern Brazil and this area has been changed by human occupation. In this context, this work aims to observe the most degraded regions of the basin, using the Landsat-5 TM satellite images and using data obtained by remote sensing and digital image processing techniques, such as vegetation index (NDVI, EVI and LAI), albedo, surface temperature and net radiation flux. Changes in vegetation cover are presented through identifying the main causes of landscape changes, the proximity to water resources and the implementation of agricultural activities.

Keywords: Remote sensing imagery, land use and human changes, digital processing image

INTRODUÇÃO

Os processos de mudanças da cobertura e uso do solo são parte das discussões globais de meio ambiente há algumas décadas, pois os processos que ocorrem na superfície do planeta têm influencia no clima. Os sistemas terrestres respondem às alterações antrópicas, causando mudanças em seus ciclos, que em resposta vão afetar as atividades humanas (Anderson e Shimabukuro, 2007). Neste sentido técnicas de sensoriamento remoto podem ser utilizadas na estimativa de parâmetros hidrológicos e de suas influências na cobertura vegetal de bacias hidrográficas. O uso de imagens orbitais caracteriza-se como uma opção a ser explorada, dado o seu caráter multiespectral, que possibilita uma análise aprofundada de componentes agrometeorológicos, como o albedo, índices de vegetação, temperatura da superfície, saldo de radiação, situação hídrica regional, etc. (Novas, 2008).

¹ Graduando em engenharia civil- UFPG – PIBIC- E-mail: john@hidro.ufcg.edu.br

² Professora adjunto da UFPG-CTRN-UAEC, Av. Aprígio Veloso 882 Bairro Universitário, Bloco BU Laboratório de Hidráulica II, 58429-900 Campina Grande. E-mail: iana_alex@uol.com.br

Essa tecnologia é de fundamental importância em atividades ligadas à gestão de bacias hidrográficas e em modelagens meteorológicas e hidrológicas (Bezzera *et al*, 2008). A banda termal assim como as demais bandas das imagens de satélite, é representada através de uma imagem composta por uma matriz de pixels em tons de cinza. Cada um dos pixels que compõem a imagem tem um número digital (ou DN – digital number) associado. Diferentes métodos podem ser utilizados para a conversão do DN em temperatura de superfície. No algoritmo SEBAL – Surface Energy Balance Algorithm for Land (Bastiaanssen *et al* 1998) a temperatura de superfície é estimada apenas com base em temperatura de brilho e da emissividade sem fazer qualquer consideração aos efeitos atmosféricos. Courault *et al* (2005) apontam como vantagens do SEBAL o fato de não requerer correções atmosféricas no cálculo da temperatura da superfície e sua operacionalidade.

O algoritmo SEBAL tem sido amplamente empregado em muitas partes do mundo e proporcionado resultados satisfatórios no âmbito dos recursos naturais e gerenciamento dos recursos hídricos (Bastiaanssen *et al*, 1998; Allen *et al*, 2001). No Brasil o algoritmo SEBAL tem sido empregado em diversas regiões. Menezes (2006) utilizou o algoritmo para determinar a evapotranspiração em regiões montanhosas no Quadrilátero Ferrífero mineiro, Silva (2006) utilizou o SEBAL para determinação do fluxo de calor sensível e latente na superfície no perímetro irrigado Senador Nilo Coelho localizado à margem do rio São Francisco, no Nordeste brasileiro, com uma área de 23.000 ha. Meireles (2007) fez estimativa da evapotranspiração real na bacia hidrográfica do Acaraú, localizado na porção norte do Estado do Ceará, abrangendo uma área total de 14.427 km², os autores demonstram em seus trabalhos que o algoritmo traz resultados satisfatórios, mesmo em áreas maiores como a de uma bacia hidrográfica.

Nos últimos anos observa-se que a cobertura vegetal do semi-árido paraibano em sua maior parte se encontra bastante antropizada em decorrência da abertura de áreas para exploração agrícola e principalmente pela exploração de lenha como fonte energética para olarias, panificadoras e uso doméstico (CBH Piranhas-Açu, 2008). A sub-bacia de São João do Rio do Peixe totalmente inserida na região semi-árida do nordeste brasileiro é uma destas áreas que sofreram com a ocupação humana.

Neste contexto este trabalho tem como objetivo caracterizar as regiões mais degradadas desta bacia, utilizando as imagens do satélite Landsat-5 TM e aplicação do algoritmo SEBAL, através dos diversos produtos obtidos pelas técnicas de processamento de imagens, tais como índices de vegetação (NDVI, EVI e IAF), albedo, temperatura de superfície e saldo de radiação para um período de 20 anos. Resultados mostram que houve diminuição do desmatamento em grande parte da bacia, mas nas regiões próximas às fontes de água onde a retirada de vegetação nativa foi utilizada para implantação de atividades agrícola, o solo encontra-se em sua maioria completamente exposto.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

A sub-bacia de São João do Rio do Peixe, que compõe a bacia do Rio Piranhas-Açu, está localizada na porção noroeste do estado da Paraíba (Figura 1), é uma bacia interior totalmente inserida na região semi-árida do Nordeste do Brasil. Possui área de aproximadamente 3.420 km² distribuída em 17 municípios, apresenta altitude mínima de 200 metros e máxima de 861 metros em relação ao nível do mar. A figura 1, mostra a elevação do terreno, as sedes municipais e a distribuição da rede de drenagem.

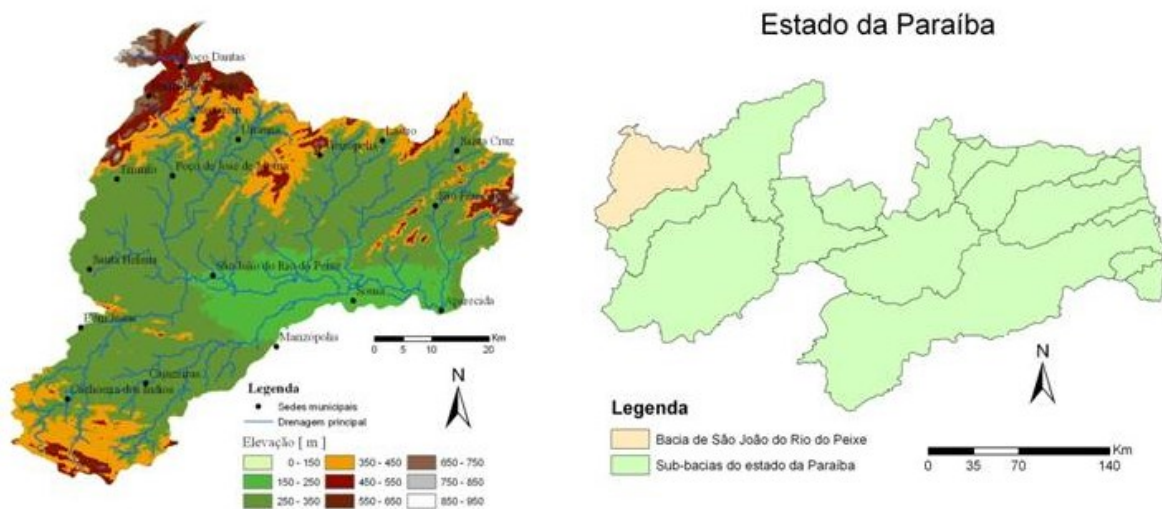


Figura 1 - Estado da Paraíba e localização da área de estudo

O clima é do tipo semi-árido, com duas estações (seca e chuvosa), com chuvas concentradas entre janeiro e abril. A pluviometria média anual varia entre 880,6 mm, 783,9 mm e 730,9 mm (medições realizadas nas estações de Cajazeiras, Souza e Pombal, respectivamente). A umidade relativa do ar apresenta máximas de 74 a 81%, entre fevereiro e maio, e mínimos entre 56% e 59%, entre setembro e novembro. As temperaturas mais baixas ocorrem em junho e julho (média abaixo de 25°C) e as temperaturas máximas entre outubro e novembro (média acima de 29°C). A maior incidência de luz solar (9,4 a 9,7 horas/dia) ocorre entre outubro-dezembro e a menor (7,6 a 8,7 horas/dia) entre junho e agosto. A evapotranspiração potencial é elevada, apresentando médias de 1.680 mm, 1.922 mm e 1.925 mm nas estações já citadas. A maior velocidade dos ventos (3,3m/s), ocorre na estiagem e a menor, de 2 m/s, nas épocas de chuvas (Ceballos *et al*, 2008).

Sabe-se que a ocupação humana ocorre com maior intensidade próximo a regiões com oferta de água, por isso, as áreas mais próximas aos corpos de água terão mais influência na ocupação desta bacia e, portanto, podem ser observadas mudanças mais significativas nos índices de vegetação, albedo, temperatura e saldo de radiação nestas áreas.

Tabela 1 – População nas cidades que compõe a bacia de São João do Rio do Peixe (Fonte: IBGE, 2009)

Cidade	População		Percentual %
	1996	2007	
Sousa	59.325	63.783	7,52
Cajazeiras	51.396	56.051	9,05
São João do Rio do Peixe	16.869	17.773	5,35
Uiraúna	14.035	14.454	2,99
Cachoeira dos Índios	8.172	8.388	2,64
Aparecida	5.018	7.323	45,93
Santa Cruz	7.005	6.480	-7,49
Marizópolis	5.801	6.214	7,12
Santa Helena	6.054	6.028	-0,43
Vieirópolis	4.547	4.756	4,60
Poço de José de Moura	3.998	3.959	-0,98
Poço Dantas	3.332	3.919	17,62
São Francisco	3.220	3.442	6,89
Bernardino Batista	2.357	3.164	34,24
Lastro	3.248	2.834	-12,75
Santarém	2.481	2.660	7,22
Bom Jesus	1.777	2.233	25,66
População Total	198.635	213.461	7,46

A tabela 1 apresenta a população para as cidades localizadas nesta bacia, nos anos de 1996 e 2007, assim como a diferença percentual entre os anos de 2007 e 1996. Na região de maior oferta de água encontram-se alguns dos municípios mais populosos, como Sousa, São João do Rio do Peixe, Uiraúna e Aparecida, esses municípios registraram aumento populacional para os anos mostrados na tabela, os municípios de Lastro e Santa Cruz registraram decréscimo populacional.

Imagens de Satélite

As imagens do satélite Landsat-5 TM (Thematic Mapper) foram adquiridas junto à Divisão de Geração de Imagens (DGI) do Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais (INPE). O satélite Landsat-5 TM foi lançado em 1984 e diante da grande disponibilidade de imagens de diferentes datas, o critério adotado para a escolha das imagens foi da menor cobertura de nuvens possível.

Assim, foram selecionadas as cenas do dia 01 de Novembro de 2008 (dia do ano 305) e do dia 23/10/1987 (dia do ano 296). Além destas imagens, outras cenas da mesma área foram adquiridas diretamente da NASA (LANDSAT, 2009) com a função de retificação geométrica das imagens obtidas no INPE. Com este procedimento pode-se melhorar a qualidade das imagens para análise visual e processamento digital das imagens, além de minimizar os efeitos de deslocamento unidimensional do relevo e de distorção tangencial da escala. Na tabela 2 encontram-se os pontos e órbitas das cenas, bem como as datas e instituições onde foram adquiridas.

Tabela 02 – Identificação de ponto, órbita, data de passagem do satélite e instituições.

Ponto	Órbita	Data	Instituições
216	64	23 de outubro de 1987	INPE
216	64	01 de novembro de 2008	INPE
216	64	09 de agosto de 1989	NASA
216	65	23 de outubro de 1987	INPE
216	65	01 de novembro de 2008	INPE
216	65	23 de outubro de 1987	NASA

As cenas do satélite LANDSAT 5 se caracterizam por 06 bandas multiespectrais e 01 banda termal, cada banda representa a resposta do solo em uma certa faixa espectral, as características detalhadas destas imagens estão apresentadas na tabela 3.

Tabela 03 – Numero de bandas, resolução espacial e faixa espectral.(Fonte: INPE)

Banda	Resolução espacial	Faixa espectral
1	30 metros	0,45 a 0,52 μm - azul
2	30 metros	0,52 a 0,60 μm - verde
3	30 metros	0,63 a 0,69 μm - vermelho
4	30 metros	0,76 a 0,90 μm - infravermelho próximo
5	30 metros	1,55 a 1,75 μm - infravermelho médio
6	120 metros	10,4 a 12,5 μm - infravermelho termal
7	30 metros	2,08 a 2,35 μm - infravermelho distante

O algoritmo SEBAL

O saldo de radiação, temperatura de superfície, albedo e índices de vegetação são obtidos segundo as etapas descritas no fluxograma da Figura 2. Para a implementação do algoritmo são necessários procedimentos computacionais de processamento digital de imagens pois todas as operações são realizadas “pixel a pixel” nas diferentes bandas espectrais das imagens de satélite selecionadas.

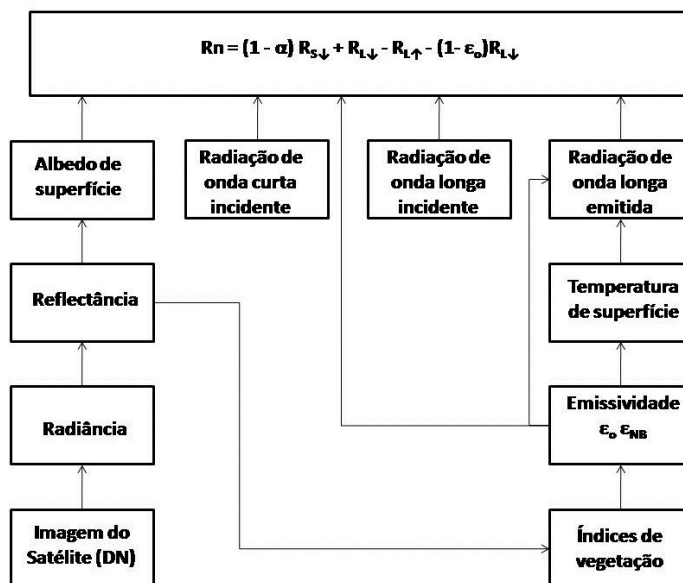


Figura 2 – Fluxograma das etapas do algoritmo SEBAL

Obtenção da Radiância

Constitui o cômputo da Radiância espectral de cada banda ($L_{\lambda i}$), ou seja, efetivação da calibração radiométrica, em que o número digital (DN) de cada pixel da imagem é convertido em radiância espectral monocromática ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$).

A radiância é a intensidade do fluxo radiante por unidade de ângulo sólido e seu conceito pode ser comparado ao conceito de brilho, ou seja, um objeto é considerado mais brilhante quanto maior for sua “radiância medida”. Essas radiâncias representam a energia solar refletida por cada pixel, por unidade de área, de tempo, de ângulo sólido e de comprimento de onda, medida ao nível do sensor TM do satélite Landsat-5 nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7. Para a banda 6, denominada banda termal, essa radiância

representa a energia emitida por cada pixel. O conjunto da radiância monocromática de todas as sete bandas do Landsat-5 TM pode ser obtido por:

$$L_{\lambda i} = L_{\lambda \min, i} + \frac{L_{\lambda \max, i} - L_{\lambda \min, i}}{255} DN \quad (1)$$

Onde:

$L_{\lambda i}$ (Mín) e $L_{\lambda i}$ (Máx) são as radiâncias espectrais mínimas e máximas;

DN = a intensidade do pixel que neste caso, varia de 0-255, e o índice corresponde às bandas espectrais 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 do sensor TM. Neste trabalho são adotados os valores de $L_{\lambda i}$ (Min) e $L_{\lambda i}$ (Max) definidos por Chander e Markham (2003).

Obtenção da Refletividade

Após o cálculo da radiância, os valores obtidos são convertidos à refletividade aparente através da seguinte equação:

$$\rho_b = \frac{\pi \cdot L_b}{E_{SUNb} \cdot d_r \cdot \cos \theta_{rel}} \quad (2)$$

Onde:

ρ_b = a refletividade espectral aparente na banda b;

d_r = inverso do quadrado da distância Terra-Sol em unidade astronômica;

θ = ângulo solar zenital;

E_{SUNb} = valor médio da irradiância solar no topo da atmosfera total na banda; em $W.m^{-2}.\mu m^{-1}$.

Todos os valores destes parâmetros são adotados de acordo com Chander e Markham (2003).

De acordo com Duffie e Beckman (1991), a estimativa de d_r para a data de obtenção da imagem pode ser dada por:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{DA \cdot 2 \cdot \pi}{365}\right) \quad (3)$$

Onde: DA (Dia do Ano) representa o dia do ano contado consecutivamente a partir do dia 1º de janeiro até a data da imagem e $\left(\frac{DA \cdot 2 \cdot \pi}{365}\right)$ é expresso em radianos.

Obtenção do Albedo

De uma maneira geral o albedo pode ser definido como a medida da quantidade de radiação solar refletida por um corpo ou uma superfície. É calculado como sendo a razão entre a quantidade de radiação refletida pela quantidade de radiação recebida. Em Astronomia o albedo depende da faixa de onda eletromagnética considerada e do ângulo de incidência. Quando nada é dito a este respeito, o albedo é considerado como sendo em relação à faixa do espectro visível e em relação à normal da superfície do astro. O albedo varia de 0 a 1. 1 equivale a uma reflexão total, isto é, toda a luz recebida é refletida, ao passo que 0 (zero) equivale a uma absorção total, isto é o astro seria totalmente negro observado do espaço. O albedo da Terra é 0,39, ou seja, a Terra reflete 39% da luz solar recebida. De forma mais específica, o SEBAL permite a obtenção do albedo planetário e do albedo de superfície.

Albedo Planetário

Albedo planetário α_{toa} , isto é, o albedo não ajustado à transmissividade atmosférica, foi obtido pela combinação linear das reflectâncias monocromáticas dos canais reflectivos do Landsat-5 TM.

$$\alpha_{toa} = 0,293\rho_1 + 0,274\rho_2 + 0,233\rho_3 + 0,157\rho_4 + 0,033\rho_5 + 0,011\rho_7 \quad (4)$$

Em que $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4, \rho_5$ e ρ_7 são reflectâncias monocromáticas (equação 2) das bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7.

Albedo de Superfície

O albedo da superfície do solo exerce um controle na quantidade de energia de ondas curtas absorvida pela superfície da terra, e, conseqüentemente, passa a ser um importante modulador do balanço de energia na superfície, influenciando os processos físico-químicos que venham a ocorrer (Meirelles, 2007).

O albedo de superfície foi calculado segundo a equação (5).

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

Onde:

α_p = a radiação solar refletida pela atmosfera, que varia entre 0,025 a 0,04 (Bastiaanssen, 2000). Neste trabalho utilizamos 0,3 para α_p .

τ_{sw} = a transmissividade atmosférica.

Segundo Allen *et al* (2002), nas condições de céu claro, a transmissividade atmosférica pode ser calculada por:

$$\tau_{sw} = 0,75 + 2 \times 10^{-5} z \quad (6)$$

Onde z é altitude de cada pixel, que pode ser obtida a partir das imagens do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM/NASA, 2003), disponíveis para download no *site* da EMBRAPA (EMBRAPA, 2009). A carta de elevação (MDT) disponível pelo projeto SRTM apresenta resolução espacial de 90m e deve ser reamostrada para que cada pixel passe a ter 30 metros de resolução espacial. Esta operação de reamostragem, comum em processamentos digitais de imagens, não adiciona informação ao modelo de elevação apenas "particiona" os pixels, mantendo a mesma informação original.

Obtenção da Radiação de onda curta incidente ($R_{s\downarrow}$)

A Radiação de onda curta incidente $R_{s\downarrow}$ ($W m^{-2}$) representa o fluxo de radiação global que atinge a superfície terrestre. Segundo Allen *et al*, 2002, para condições de céu claro utiliza-se a equação:

$$R_{s\downarrow} = G_{SC} \times \cos\theta \times d_r \times \tau_{sw} \quad (7)$$

Onde:

G_{SC} = constante solar ($1.367 W m^{-2}$);

$\cos\theta$ = Cosseno do ângulo solar incidente;

d_r = inverso do quadrado da distância Terra-Sol em unidade astronômica (equação 3);

τ_{sw} = a transmissividade atmosférica (equação 6).

Obtenção dos Índices de Vegetação (NDVI, SAVI, EVI, IAF)

Da operação algébrica das refletividades dos canais do vermelho e do infravermelho próximo obtém-se o NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada). Este índice é usado para identificar a presença de vegetação verde na superfície, o que permite caracterizar sua distribuição espacial, bem como a evolução do seu estado ao longo do tempo, a qual é determinada pelas variações das condições climáticas dominantes, bem como pelos ciclos fenológicos anuais (Folhes, 2007). O NDVI define-se como:

$$NDVI = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3} \quad (8)$$

Onde:

ρ_4 = a refletividade no Infravermelho próximo;

ρ_3 = a refletividade no vermelho.

Para o cálculo do Índice de Vegetação Ajustado para os Efeitos do Solo (Soil Adjusted Vegetation Index – SAVI) que é um índice que busca amenizar os efeitos do "background" do solo, é utilizado a expressão:

$$SAVI = \frac{(1+L) \cdot \rho_4 - \rho_3}{(L + \rho_4 + \rho_3)} \quad (9)$$

Onde: L é o fator de ajuste do solo. O fator de correção L pode variar entre 0, para coberturas vegetais mais densas, e 1 para vegetação menos densa. O valor padrão utilizado na maioria das aplicações é 0,5, que corresponde a uma densidade vegetal intermediária (Oliveira *et al*, 2007).

O EVI (*Enhanced Vegetation Index*) foi desenvolvido para aperfeiçoar o sinal da vegetação, com melhor sensibilidade em alta biomassa melhorada através do acompanhamento do dossel³ e redução da influência atmosférica (Jiang *et al*, 2008).

$$EVI = G \frac{(\rho_4 - \rho_3)}{(\rho_4 + C_1 \cdot \rho_3 - C_2 \cdot \rho_1 + L)} \quad (10)$$

Onde:

ρ_4 = refletividade no infravermelho próximo;

³ Tudo aquilo que compõe a parte aérea de uma comunidade de plantas

ρ_3 = refletividade no vermelho;
 ρ_1 = refletividade no azul;
 C_1 = Coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos para o vermelho (6);
 C_2 = Coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos para o azul (7,5);
 L = Fator de correção para a interferência do solo (1);
 G = Fator de ganho (2,5).

Utilizamos nestes os coeficientes C_1 , C_2 , L , G disponíveis em Jiang *et al* (2008) e definidos por Huete *et al* (1994).

O Índice de área Foliar (IAF) é definido pela razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área utilizada por essa vegetação. O IAF é um indicador da biomassa de cada pixel da imagem e o mesmo é computado pela seguinte equação empírica obtida por (Allen *et al*, 2002):

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

No METRIC (*Mapping EvapoTranspiration with high Resolution and Internalized Calibration*) que é um aperfeiçoamento das técnicas utilizadas no SEBAL, o IAF é limitado em 6,0 quando SAVI=0,69 e IAF=0 quando SAVI<0,1 (Allen *et al*, 2007). Neste trabalho utilizamos os limites definidos no METRIC.

Obtenção da Emissividade

Para a obtenção da temperatura na superfície, é utilizada a equação de Plank invertida, válida para um corpo negro. Como cada pixel não emite radiação eletromagnética como um corpo negro, há a necessidade de introduzir a emissividade de cada pixel no domínio espectral da banda termal imageada pelo canal termal ε_{NB} . Por sua vez, quando do cômputo da radiação de onda longa emitida por cada pixel, há de ser considerada a emissividade no domínio da banda larga ε_0 (5-100 μ m). Segundo Allen *et al* (2002) as emissividades ε_{NB} e ε_0 podem ser obtidas, para NDVI > 0 e IAF < 3, segundo:

$$\varepsilon_{NB} = 0,97 + 0,0033 \times IAF \quad (12)$$

$$\varepsilon_0 = 0,95 + 0,01 \times IAF \quad (13)$$

Para pixels com IAF \geq 3, $\varepsilon_{NB} = \varepsilon_0 = 0,98$.

Obtenção da Temperatura de Superfície

Para a obtenção da temperatura da superfície (T_s) são utilizados a radiância espectral da banda termal $L_{\lambda 6}$ e a emissividade ε_{NB} obtida pela equação (1) e (12) respectivamente. Dessa forma, obtém-se a temperatura da superfície (K) pela expressão:

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{NB} K_1}{L_{\lambda 6}} + 1\right)} \quad (14)$$

Segundo Chander e Markhan (2003) $K_1 = 607,76$ ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$) e $K_2 = 1260,56K$ são constantes de calibração da banda termal do Landsat TM-5.

Radiação de onda longa emitida pela superfície ($R_{L\uparrow}$)

A radiação de onda longa emitida pela superfície $R_{L\uparrow}$ ($W m^{-2}$) foi obtida através da equação de Stefan-Boltzmann:

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_o \times \sigma \times T_s^4 \quad (15)$$

Onde ε_o é emissividade de cada pixel obtidos na equação (13), σ é constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$) e T_s é temperatura de superfície obtida na equação (18).

Radiação de onda longa incidente emitida pela atmosfera ($R_{L\downarrow}$)

A radiação de onda longa descendente, emitida pela atmosfera na direção da superfície $R_{L\downarrow}$ ($W m^{-2}$), foi calculada pela equação de Stefan-Boltzmann:

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a \times \sigma \times T_a^4 \quad (16)$$

Onde:

ε_a = a emissividade atmosférica calculada pela equação (17);

σ = a constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$);

T_a = a temperatura média do ar obtida na estação em Kelvin (Bastiaanssen et al, 1995)

$$\varepsilon_a = 0,85 \times -(\ln \tau_{SW})^{0,9} \quad (17)$$

$$R_{L\downarrow} = (0,85 \times -(\ln \tau_{SW})^{0,9}) \times \sigma \times T_a^4 \quad (18)$$

$$R_{L\downarrow} = (0,85 \times -(\ln \tau_{SW})^{0,9}) \times \sigma \times T_{cold}^4 \quad (19)$$

Pode-ser utilizar na equação 18 o valor do T_{cold} para T_a , Onde, T_{cold} significa o valor do “pixel frio” que é obtido na carta de temperatura, nas regiões de maior vigor vegetativo, geralmente em áreas irrigadas (Allen et al, 2002)

Balço de radiação à superfície

O balanço de radiação da superfície terrestre é obtido pela contabilização da radiação de onda curta e onda longa que incide e que deixa a superfície. O saldo entre a quantidade de energia radiante incidente sobre a superfície terrestre e a quantidade de energia radiante emergente, representa a quantidade de energia disponível para os processos de aquecimento da atmosfera, do solo e da água e da evapotranspiração (Folhes, 2007). O saldo de radiação à superfície é obtido utilizando a equação de balanço de radiação à superfície (Silva et al, 2005; Allen et al, 2002).

$$R_n = (1 - \alpha) \times R_{S\downarrow} - R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} + (1 - \varepsilon)R_{L\downarrow} \quad (20)$$

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na tabela 4, estão apresentados os índices pluviométricos, para os postos de São Francisco e Sousa, localizados na bacia de São João do Rio do Peixe. São apresentados os valores precipitados nos três meses que antecederam as imagens em estudo, assim como o total precipitado ao ano. Observa-se que no ano de 2008 houve um volume precipitado maior do que em 1987. Para o período de três meses que antecede a captura das imagens percebe-se que houve pouca variação entre os anos de 1987 e 2008. As regiões de clima semi-árido apresentam vegetação dinâmica respondendo rapidamente à presença ou à falta de chuvas. Como o período de três meses é similar para cada ano estudado, então a vegetação deve apresentar as mesmas necessidades hídricas.

Tabela 4 – Pluviometria em mm para o ano de 2008 e 1987 (Fonte: AESA, 2009)

2008				
Posto	Agosto	Setembro	Outubro	ANO
São Francisco	18,4	1,6	0,0	986,0
Sousa	3,0	0,0	0,0	1399,0
1987				
Posto	Agosto	Setembro	Outubro	ANO
São Francisco	0,0	0,0	0,0	598,0
Sousa	27,6	0,0	5,9	859,4

Os índices de vegetação dentre outras coisas, ressaltam o comportamento espectral da vegetação em relação ao solo e a outros alvos da superfície terrestre (Moreira, 2005). A partir das refletividades das bandas do Landsat 5 TM foram obtidos os índices de vegetação conforme a metodologia apresentada. Devido à dinâmica da vegetação na bacia, de clima semi-árido, podem ser usados os índices NDVI, EVI e IAF, para demonstrar o comportamento vegetativo da bacia.

O NDVI é um índice que mede a quantidade e condições de estresse hídrico. Este índice pode variar de -1 a 1, os valores menores que 0 ocorrem em regiões com presença de água, valores entre 0 e 0,3 ocorre em regiões de solo exposto, e maiores que 0,3 até 1 em regiões vegetadas.

A figura 3 apresenta os mapas de NDVI obtidos para os dias 23 de Outubro de 1987 e 01 de Novembro de 2008. Nas regiões próximas aos corpos hídricos, os valores indicam grandes áreas de solos expostos para as duas datas, sendo que no ano de 2008 observa-se que essas áreas estavam ainda maiores. Comparando os mapas de 1987 e 2008 percebe-se um aumento nos valores dos índices de vegetação para grande parte da bacia especialmente nas áreas de maior altitude. É possível identificar que houve aumento do NDVI através dos histogramas da figura 4 onde observa-se que a média dos valores de NDVI é de 0,2344 para 23/10/1987 e 0,2454 para 01/11/2008.

A figura 5 apresenta uma imagem disponível no Google Maps do dia 04 de setembro de 2004. Observa-se que no trecho entre as cidades de São João do Rio do Peixe e Sousa, nesta data há muitas áreas sem

cobertura vegetal. O Rio do Peixe apresenta uma estreita faixa de vegetação (aproximadamente 10 metros), e algumas áreas de agricultura.

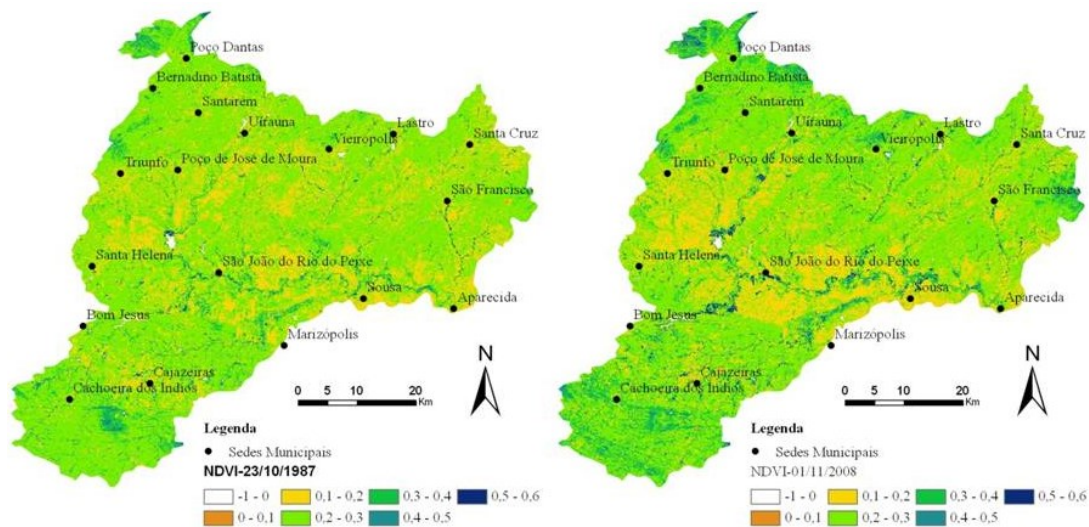


Figura 3 – Mapa de NDVI de 23 de Outubro de 1987 e 01 de Novembro de 2008

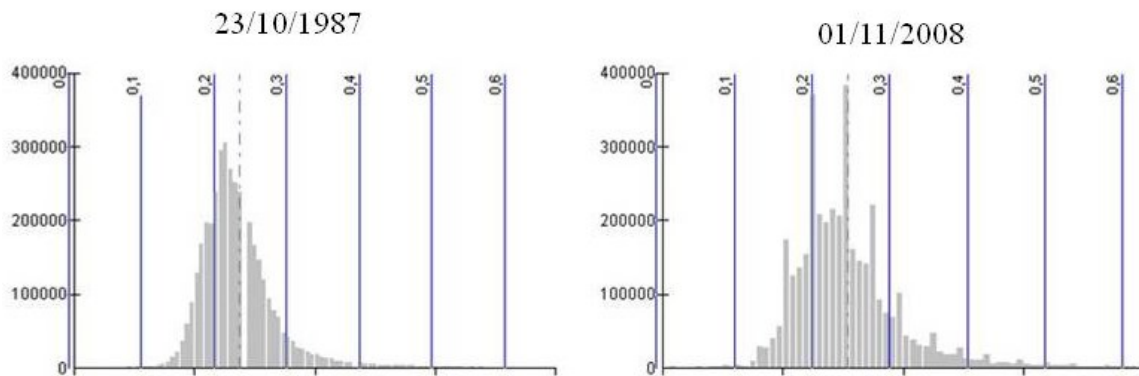


Figura 4 – Histogramas de NDVI de 23 de Outubro de 1987 e 01 de Novembro de 2008.



Figura 5 – Área entre os municípios de São João do Rio do Peixe e Sousa (Fonte:Google Maps).

O EVI apresentado na figura 6 é um índice que utiliza mais informação do espectro eletromagnético do que o NDVI, por utilizar as bandas 2, 3 e 4, enquanto que o NDVI utiliza as bandas 3 e 4. O EVI é um índice desenvolvido para realçar o sinal da vegetação através da otimização da sensibilidade em regiões com altos valores de biomassa, permitindo realizar um melhor monitoramento da vegetação através da redução dos efeitos de substrato do dossel e da influência da atmosfera (Huete *et al*, 1994; Huete *et al*, 1997 *apud* Lacruz e Santos, 2007).

Este índice apresenta valores maiores (próximos de 1) para vegetações de maior porte, o que não acontece na região semi-árida que tem vegetação com poucas folhas e de pequena dimensão, e apresenta queda das folhas na estação seca. Apesar deste índice não ser ideal para medir o vigor vegetativo em áreas de semi-árido, pode-se analisar que a vegetação com maior biomassa aumentou do período de 1987 a 2008.

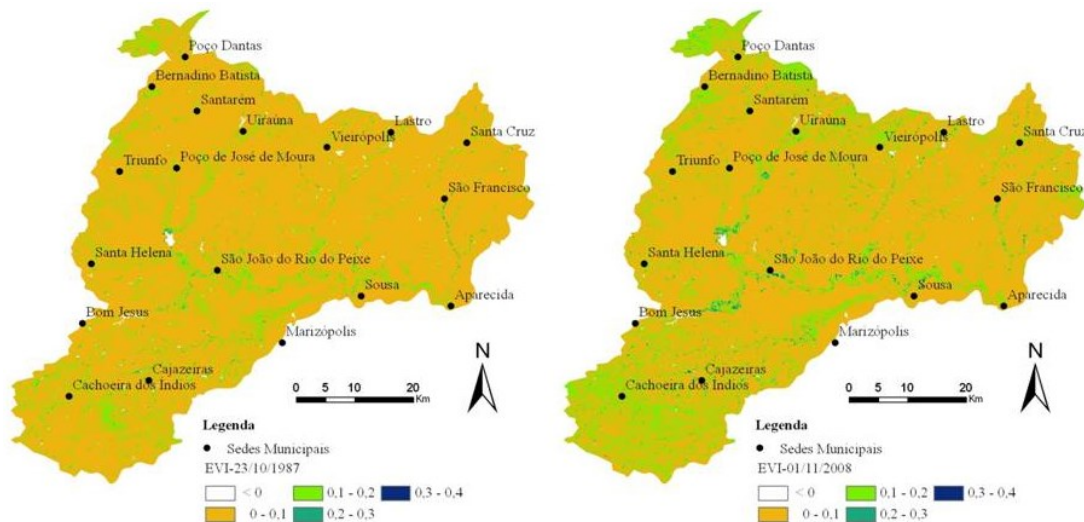


Figura 6 – Mapa de EVI de 23 de Outubro de 1987 e 01 de Novembro de 2008

O IAF apresentado na figura 7 é um indicador da biomassa de cada pixel da imagem. Observa-se que para a imagem de 23 de Outubro de 1987 os valores de IAF apresentam-se abaixo dos encontrados para a imagem de 01 de Novembro de 2008. As duas imagens apresentam valores concentrados mais altos em algumas regiões devido à vegetação ribeirinha e plantações nas margens dos rios. Esse fenômeno é mais observado para o ano de 2008 devido ao aumento de áreas agrícolas. Nestes mapas de IAF fica evidenciado o aumento de biomassa para toda a bacia exceto nas áreas centrais, que estão com o solo exposto na época de passagem do satélite (período seco). Áreas como essas tornam-se prejudiciais à bacia como um todo, pois, o período chuvoso nesta região é concentrado em um período de quatro meses, ocorrendo precipitações de grande intensidade. Nesse sentido, essas águas colidem com solo nu carregando sedimentos para os corpos d'água e retirando os nutrientes da terra tornando estes solos ainda mais pobres e o leito do rio mais raso.

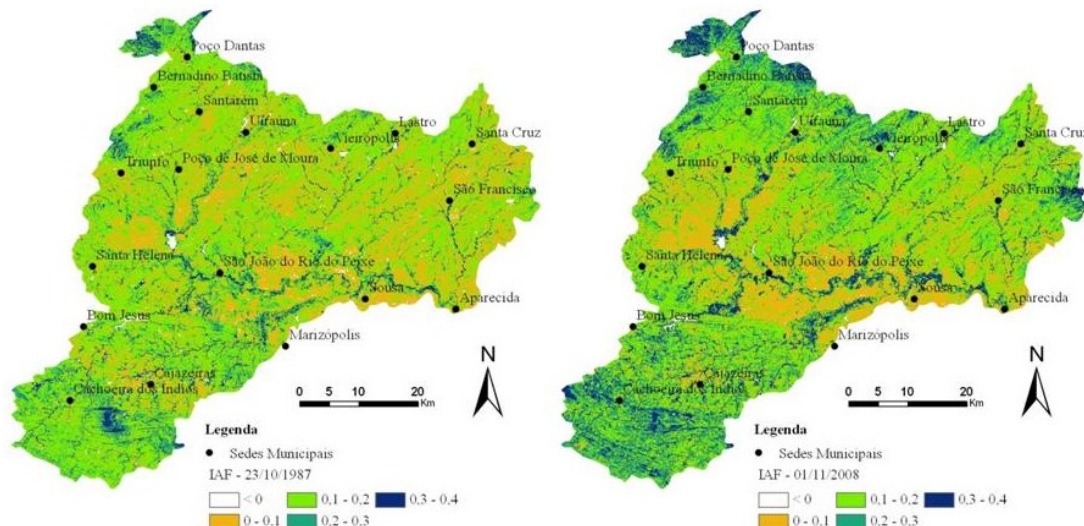


Figura 7 – Mapa de IAF de 23 de Outubro de 1987 e 01 de Novembro de 2008.

A figura 8 apresenta a diminuição da temperatura para os dois períodos estudados (1987 e 2008). Este fato é comprovado pelos histogramas da figura 9 nos quais, percebe-se que a média no ano de 1987 é de 32,91°C e no ano de 2008 é de 29,53°C. Segundo a figura 10, por volta das 10 horas da manhã, hora de passagem do satélite, materiais como solo exposto seco e rocha estão com maior temperatura radiante do que a vegetação e a água. Isto ocorre por que esses materiais têm capacidade térmica diferentes, a água apresenta capacidade térmica superior à rocha e ao solo exposto seco. A temperatura da água flutua pouco em relação ao solo e à rocha.

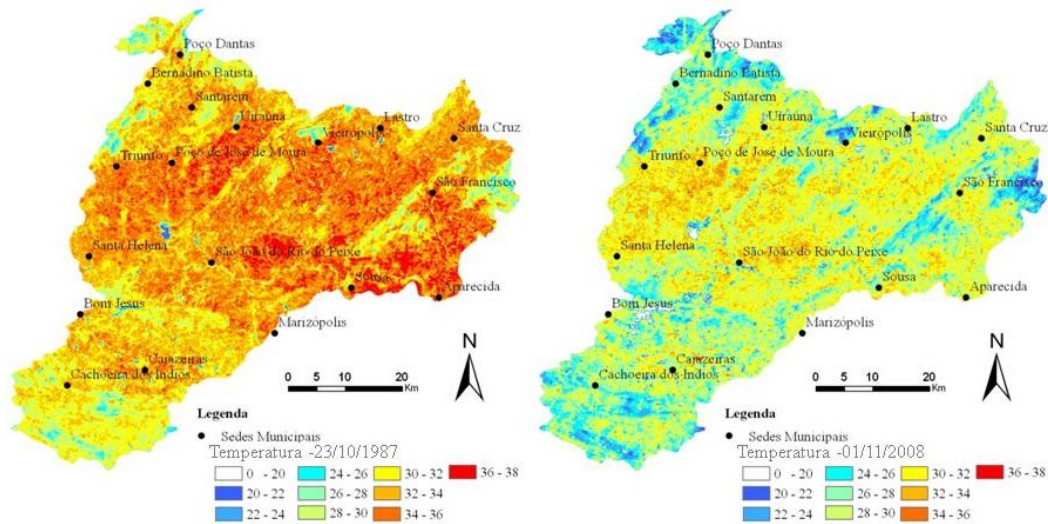


Figura 8 – Mapa de temperatura da superfície de 23 de Outubro de 1987 e 01 de Novembro de 2008

Devido a esse fenômeno a imagem de 23 de outubro de 1987, apresenta temperatura de superfície superior à imagem de 01 de novembro de 2008, por possui uma maior quantidade de solo exposto distribuída por toda a bacia. Os valores de temperatura de superfície mais elevados encontrados na imagem de 01 de Novembro de 2008 correspondem às regiões de menor cobertura vegetal.

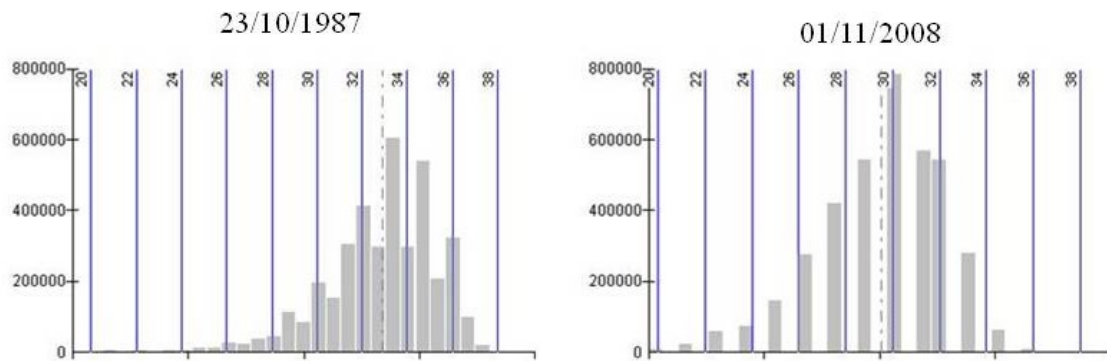


Figura 9 – Histograma da temperatura da superfície de 23 de Outubro de 1987 e 01 de Novembro de 2008.

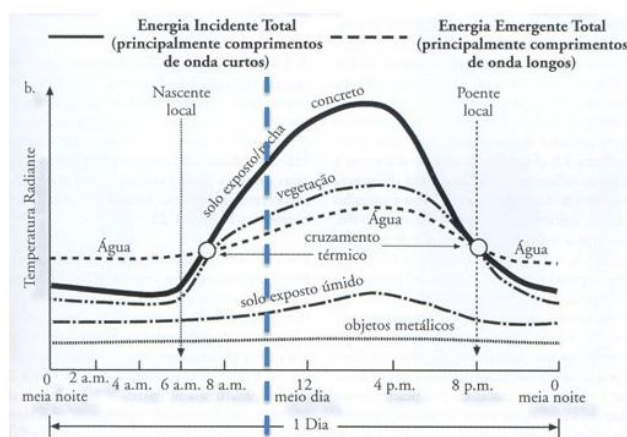


Figura 10 - Temperatura radiante diária de solo exposto, rocha, concreto, vegetação, solo exposto úmido e objetos metálicos. Adaptado de Jensen (2009)

O saldo de radiação R_n apresentado na figura 11 mostra mudanças significativas para as imagens estudadas. Os valores do saldo de radiação mais baixo são encontrados nas regiões de solo exposto, novamente observam-se para as duas datas estudadas valores mais baixos nas áreas onde há maior presença da ação humana. Observa-se que no ano de 1987 áreas com solo exposto apresentam-se espalhadas em toda a bacia e no ano de 2008 elas estão mais concentradas nas regiões próximas as áreas

destinadas ao cultivo. O valor do saldo de radiação obtido para essas áreas foi inferior a 600 W/m^2 . Os valores de R_n mais elevados foram encontrados nos corpos de água com 900 W/m^2 . A imagem de 2008 é que apresenta os maiores valores de R_n , mostrando que a região teve aumento vegetativo nas áreas de maior altitude e um aumento da exposição do solo nu nas áreas próximas às fontes hídricas. Através dos histogramas da figura 12 observa-se o aumento da média do saldo de radiação para a bacia de São João do Rio do Peixe. (Para o ano de 1987: média de 716 W/m^2 e para o ano de 2008: média de 759 W/m^2).

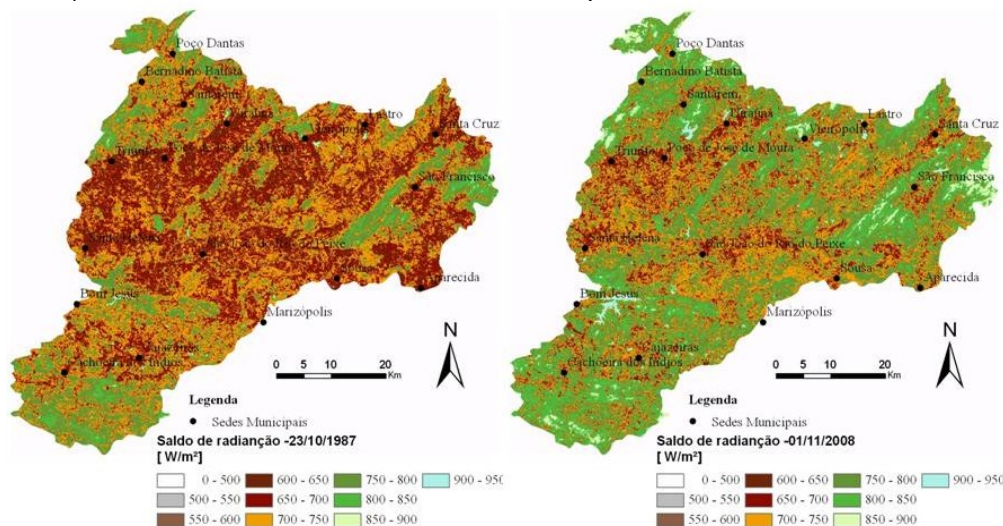


Figura 11 – Mapa de saldo de radiação de 23 de Outubro de 1987 e 01 de Novembro de 2008

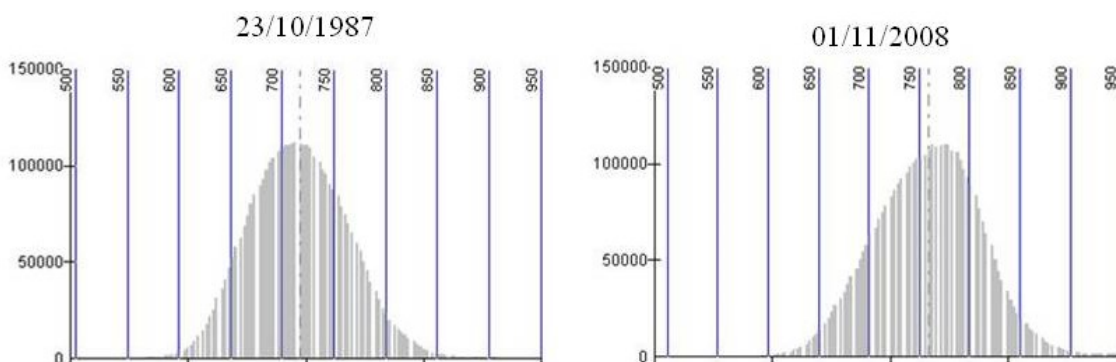


Figura 12 - Histograma do saldo de radiação de 23 de Outubro de 1987 e 01 de Novembro de 2008.

CONCLUSÕES

As imagens escolhidas para o estudo encontram-se no final do período seco não ocorrendo o fenômeno de chuva de forma significativa nos últimos três meses que antecedem a obtenção das mesmas pelo satélite Landsat-5, por isso, a vegetação na bacia apresenta as mesmas necessidades hídricas.

A análise entre os dois períodos, aponta para um aumento vegetativo na bacia, demonstrados nos mapas de NDVI, EVI, IAF, Temperatura de superfície e Saldo de Radiação.

Com base neste trabalho, percebe-se que as imagens do sensor Thematic Mapper do satélite Landsat 5 podem subsidiar análises ambientais, por possuir uma longa série de dados com mais de 25 anos de imagens coletadas da superfície terrestre. Pode-se dizer que sua resolução espacial média (30 metros) atende as necessidades de trabalhos desta natureza.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (Conselho Nacional de Pesquisa) pelo apoio financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AESA **Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba** Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/>. Acessado em 15 de março de 2009.
- ALLEN, R. G.; ALLEN, 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.

- ALLEN, R. G.; BASTIAANSEN, W.; TASUMI, M.; AND MORSE, A. Evapotranspiration on the watershed scale using the SEBAL model and Landsat images. Proc., 2001 ASAE **Annual Int. Meeting**, ASAE, St. Joseph, Mich., Artigo No. 01-2224.
- ALLEN, R.G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evatranspiration with Internalized Calibration (METRIC)-Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, p.380-394, 2007.
- ALLEN, R.G.; TASUMI, M.; TREZZA, R.. **SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land). Advance Training and Users Manual** – Idaho Implementation, version 1.0, 2002.
- ANDERSON L. O.; SHIMABUKURO Y. E. Monitoramento da cobertura terrestre: fenologia e alterações antrópicas. **O sensor Modis e suas aplicações ambientais no Brasil/** organizadores, Bernardo F. T. Rudorff, Yosio E. Shimabukuro, Juan C. Ceballos- São José dos Campos, SP: A. Silva Vieira Ed.,2007. P.185-205.
- BASTIAANSEN W.G.M; MENENTI M.; FEDDES R.A.; HOLTSLAG A.A.M. (1998) A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. formulation. **J Hydrol** 212–213:198–212
- BASTIAANSEN, W. G. M. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. Tese (Ph.D.). **Wageningen Agricultural University, Wageningen**, The Netherlands, 1995.
- BEZZERA, B. G.; SILVA, B.B.da; FERREIRA, N. J. Estimativa Da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM-LANDSAT 5. **Revista brasileira de Meteorologia** V.23, n.3, 305-317. 2008
- CBH-PIRANHAS-AÇU. <http://www.piranhasacu.cbh.gov.br/default.aspx>. Acessado em Novembro de 2008.
- CEBALLOS, B. S. O. ; ALBUQUERQUE, J. P. T; MARACAÇA, R.; PINHEIRO, K. M.; GALVÃO, M. J. T. G.; GUIMARÃES, A. O. ; Srinivasan, V. S.. Distribuição da qualidade da água subterrânea da bacia sedimentar do Rio do Peixe-PB. In: **Anais VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, 2006, Garanhuns. ANAIS DO VIII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE. Recife-PE: ABRH, 2006. V. 01. p. 1-19.
- CHANDER G.; MARKHAM B. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges. **IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING**, VOL. 41, NO. 11, NOVEMBER 2003.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. Solar engineering of thermal process, 2nd Ed., Wiley, N.Y, 1991.
- EMBRAPA**. <http://www.relevobr.cnpem.embrapa.br/download/pb/pb.htm>. Acessado em Outubro de 2008.
- FOLHES, M. T. Modelagem da evapotranspiração para a gestão hídrica de perímetros irrigados com base em sensores remotos. (Tese Doutorado em Sensoriamento Remoto) – **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais** – INPE, São José dos Campos,2007
- Google Maps**. Disponível em: <http://maps.google.com/?ie=UTF8&ll=-6.753388,38.347263&spn=0.020499,0.027637&t=h&z=15>. Acessado em 15 de maio de 2009.
- IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/>. Acessado em 03 de março de 2009.
- INPE. **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br>>, acessado em março de 2008.
- JENSEN, J. R. Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestre/John R. Jensen; Tradução José Carlos Neves Epiphanyo (coordenador) – São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009.p.277.
- JIANG Z.; HUETE A. R. ; DIDAN K.; MIURA T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. **Remote Sensing of Environment** 112 (2008) 3833–3845
- LACRUZ M. S. P. ; SANTOS J. R. Monitoramento da paisagem de unidades de conservação. **O sensor Modis e suas aplicações ambientais no Brasil/** organizadores, Bernardo F. T. Rudorff, Yosio E. Shimabukuro, Juan C. Ceballos- São José dos Campos, SP: A. Silva Vieira Ed.,2007.p. 173-182.
- LANDSAT. Landsat.org, Global Observatory for Ecosystem Services, Michigan State University. Disponível em <http://landsat.org>. Acesso em novembro de 2008.
- MEIRELES, Marcos - **Universidade Federal do Ceará, Fortaleza**, 2007 Dissertação (mestrado) Estimativa da evaporação real pelo emprego do algoritmo SEBAL e imagem Landsat 5-TM na Bacia do Acaraú - CE
- MENEZES, Sady Júnior Martins da Costa de Menezes, M. Sc., **Universidade Federal de Viçosa**, agosto de 2006. Evapotranspiração regional utilizando o SEBAL em condições de relevo montanhoso.
- MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicações**. 3º edição. 2005. Editora UFV.
- NOVAS, Maria Fátima Bettini. Mapeamento das estimativas do saldo de radiação e índices de vegetação em área do estado de Alagoas com base em sensores remotos. Orientador: Dr. Frederico Tejo Di Pace, Maceió-AL, **UFAL**, 2008. Dissertação (Mestrado em Meteorologia).
- OLIVEIRA L. G. L.; PEREIRA L. M.; PEREIRA G.; MORAES E. C.; MAEDA E. E. Estudo da variabilidade de índices de vegetação através de imagens do ETM+/LANDSAT 7. **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 5995-6002.
- SANTOS, C.; LORITE, I. J.; TASUMI, M. ALLEN, R. G.; FERERES E. Integrating satellite-based evapotranspiration with simulation models for irrigation management at the scheme level. **Irrigation Science** (2008) 26: 277–288

SILVA B. B. da; 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.

SILVA, B. B. da; BEZERRA M. V. C. Determinação do Fluxo de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens TM-Landsat 5. **Revista brasileira de agrometeorologia**, v. 14, n.2, p.174-186, 2006.

TASUMI M.; TREZZA R.; ALLEN R.G.; WRIGHT J. (2005B) Operational aspects of satellite-based energy balance models for irrigated crops in the semi-arid U.S. **Irrig Drain Syst** 19:355–376.