

## Space-temporal distribution of soil moisture by remote sensing techniques

Jhon Lennon B. da Silva<sup>\*</sup>, Francisco Dirceu D. Arraes<sup>\*\*</sup>, José Diorgenes A. Oliveira<sup>\*\*\*</sup>, Geber Barbosa de A. Moura<sup>\*\*\*\*</sup>, Alan C. Bezerra<sup>\*\*\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Mestre em Engenharia Agrícola; Departamento de Engenharia Agrícola PGEA/UFRPE. Av. D. Manoel de Medeiros, SN; Dois Irmãos, Recife, Pernambuco, Brasil; CEP: 52171-900. E-mail: jhonlennoigt@hotmail.com (autor correspondente).

<sup>\*\*</sup> Doutor em Agronomia; Professor do IFSERTÃO – Campus Salgueiro, Pernambuco, Brasil. E-mail: dirceuarraes@gmail.com

<sup>\*\*\*</sup> Mestre em Engenharia Agrícola; PGEA/UFRPE, Recife, Pernambuco, Brasil. E-mail: josediorgenes@gmail.com

<sup>\*\*\*\*</sup> Doutor em Oceanografia; Professor associado UFRPE, Recife, Pernambuco, Brasil. E-mail: geber@depa.ufpe.br

<sup>\*\*\*\*\*</sup> Mestre em Engenharia Agrícola; Professor assistente da UFRPE –UAST/UFRPE, Serra Talhada, Pernambuco, Brasil. E-mail: cezaralan.a@gmail.com

Received 15 July 2017; accepted 5 September 2017

### Abstract

Determination of soil moisture distribution is complex and timely. Becoming unable to describe the behavior of its spatial and temporal distribution on a regional scale. The objective of this study was to estimate and evaluate the spatial and temporal variability of soil moisture by means of the instantaneous evaporative fraction in the semi-arid region using remote sensing data. Three images of the Landsat 5 sensor satellite TM were used, on the dates 09/21/2008, 06/20/2009 and 08/29/2011, covering the area of study: the municipality of Iguatu, located in the state of Ceará, Brazilian semi-arid region. These images were processed from ERDAS imagine software 9.1, where the radiometric calibration and conversion to radiance and reflectance were performed using complementary surface data using the SEBAL algorithm. The thematic maps of the energy balance biophysical parameters: instantaneous evaporative fraction (FE) and the degree of soil moisture saturation ( $\theta/\theta_{sat}$ ) were processed by the ArcGis 10.2.2 software. The descriptive statistics was used to determine the differences of FE and  $\theta/\theta_{sat}$  in relation to the anthropological actions and the local climate of the region. Therefore, the monitoring of these biophysical parameters, mainly the degree of soil moisture saturation showed to be an effective part of the energy balance, configuring before them the power to make decisions regarding environmental aspects in general. The estimation of the spatial pattern of the degree of soil moisture saturation presented consistent values for the different uses and occupations of the soil, showing a great relation with the values of the evaporative fraction in all the studied images.

Keywords: energy balance; evaporative fraction; land use.

### Distribuição espaço-temporal da umidade do solo por meio de técnicas de sensoriamento remoto

#### Resumo

A determinação da distribuição da umidade do solo é complexa e pontual, tornando-se incapaz de descrever o comportamento de sua distribuição espacial e temporal em escala regional. Com isso, objetivou-se estimar e avaliar a variabilidade espaço-temporal da umidade do solo por meio da fração evaporativa instantânea em região semiárida utilizando dados de sensoriamento remoto. Foram utilizadas três imagens do satélite Landsat 5 de sensor TM, nas datas 21/09/2008, 20/06/2009 e 29/08/2011 que cobrem a área de estudo: o município de Iguatu, semiárido brasileiro. Essas imagens foram processadas a partir do software ERDAS imagine 9.1, onde realizou-se os processos de calibração radiométrica e a conversão para radiação e refletância através de dados complementares de superfície utilizando o algoritmo SEBAL. Os mapas temáticos dos parâmetros biofísicos do balanço de energia: fração evaporativa instantânea (FE) e o grau de saturação de umidade do solo ( $\theta/\theta_{sat}$ ) foram processadas pelo software ArcGis<sup>®</sup> 10.2.2. A estatística descritiva foi utilizada para determinar as diferenças da FE e  $\theta/\theta_{sat}$  diante das ações antropológicas e do clima local da região. Portanto, o monitoramento desses parâmetros biofísicos, principalmente do grau de saturação de umidade do solo mostraram ser parte efetiva do balanço de energia, configurando diante deles o poder na tomada de decisões quanto aos aspectos ambientais. A estimativa do padrão espacial do grau de saturação de umidade do solo apresentou valores consistentes para os distintos usos e ocupações do solo, mostrando grande relação com os valores da fração evaporativa em todas as imagens estudadas.

Palavras-chave: Balanço de energia, fração evaporativa, uso da terra.

## 1. Introdução

Nos últimos anos com o avanço do sensoriamento remoto baseado em imagens de satélite ou de outras plataformas, tornou-se possível o monitoramento de diferentes e grandes áreas dos diversos biomas existentes no mundo (Bastiaanssen et al., 2000; Arraes et al., 2012). Com isso, diversos pesquisadores (Scott et al., 2003; Nicácio, 2008; Lopes et al., 2011; Younis e Iqbal, 2015) passaram a observar a estimativa da umidade do solo utilizando dados de sensoriamento remoto com base no particionamento do balanço de energia, através principalmente, da fração evaporativa.

A umidade do solo é fundamental para a gestão dos recursos hídricos, conseqüentemente, no processo de tomada de decisão nos diversos processos que envolve a interface entre superfície e atmosfera, devido, estar intimamente ligada à disponibilidade de água, a evapotranspiração da superfície terrestre, nos processos de recarga de água subterrânea e, principalmente, na programação de irrigação, entre outros processos (Scott et al., 2003; Younis e Iqbal, 2015).

Bastiaanssen et al. (2000) afirmam que a fração evaporativa é um indicador das condições de umidade do solo, que pode ser obtida a partir da razão entre o fluxo de calor latente (LE) e a diferença entre o saldo de radiação ( $R_n$ ) e o fluxo de calor no solo (G), conseqüentemente obtêm-se a umidade do solo na zona da raiz. Posto isso, Scott et al. (2003) sugeriram o uso de um método baseado na relação não linear entre a umidade do solo e a fração evaporativa, relação universal e padrão para obtenção da umidade do solo, que apresenta um erro médio de  $0,05 \text{ cm}^{-3} \text{ cm}^{-3}$ .

A determinação da umidade do solo é complexa e pontual, toma-se muito tempo no envolvimento de medições em campo, acarreta um alto custo e os esforços são grandes. Tornando-se incapaz de descrever o comportamento de sua distribuição espacial e temporal em escala regional. Por essa razão, as técnicas de sensoriamento remoto podem presumir o status de umidade superficial do solo e informações

sobre sua distribuição espacial e temporal em larga escala (Bezerra et al., 2013; Younis e Iqbal, 2015).

Diante desse contexto, objetivou-se estimar e avaliar a variabilidade espaço-temporal da umidade do solo por meio da fração evaporativa instantânea em região semiárida utilizando dados de sensoriamento remoto.

## 2. Material e métodos

O município de Iguatu, selecionado para este estudo, está inserido na mesorregião Centro-Sul do estado do Ceará, Região Nordeste do Brasil, localizado nas coordenadas geográficas e na respectiva altitude:  $6^\circ 21' 34'' \text{ S}$  e  $39^\circ 17' 55'' \text{ W}$ , 217,8 m, estando à aproximadamente 384 km da capital Fortaleza (IPECE, 2015).

De acordo com a classificação de Köppen, a área de estudo está inserida na zona climática do tipo BSw'h', clima quente e semiárido, caracterizado pela insuficiência de chuvas, com precipitação média anual de 806,5 mm e temperatura média mensal de 26 a 28 °C. O período chuvoso do município é compreendido entre os meses de janeiro a abril, possuindo duas estações bem definidas durante todo o ano: chuvosa e seca, sendo que a estação seca pode configurar-se de 7 a 8 meses de duração, possuindo geralmente nesse período temperaturas elevadas ocorrendo forte evaporação (Arraes et al., 2009).

Possui uma área absoluta de  $1.029 \text{ km}^2$  com relevo formado por depressões sertanejas, onde a vegetação predominante é a Caatinga arbustiva densa e solos Aluviais, Litólicos, Podzólicos Vermelho-Amarelo e também Vertissolos (FUNCEME, 2015; IPECE, 2015).

A Figura 1 apresenta a área de estudo: município de Iguatu – CE, imagem em cor natural de composição RGB-321 com resolução espacial de 30 m do satélite Landsat 5-TM do dia 29 de agosto de 2011, destacando-se os açudes Trussu e Orós e a estação meteorológica automática que foi coletado os dados de superfície. O sistema de projeção cartográfica é UTM, DATUM: WGS 1984 de zona 24 S.

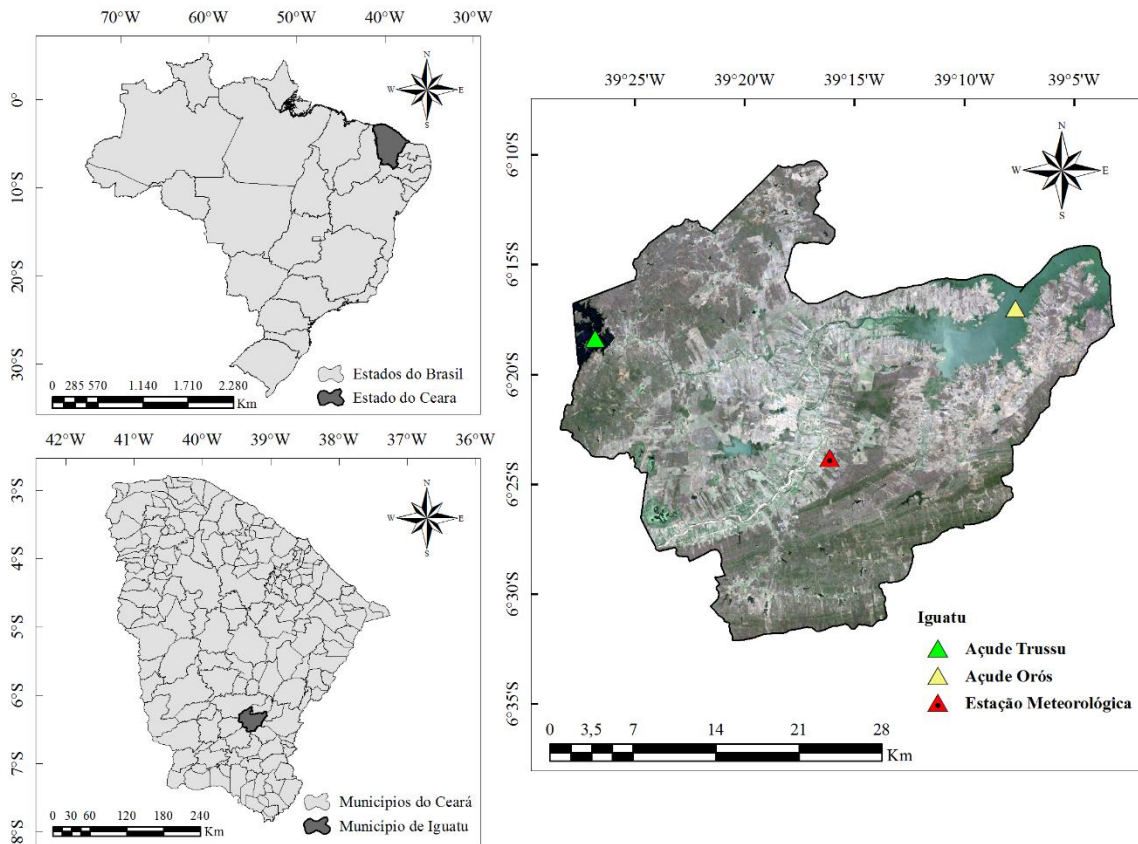


Figura 1 - Mapa espacial de localização da área de estudo: Iguatu – CE, imagem do satélite Landsat 5-TM no dia 29 de agosto de 2011 em cor natural na composição RGB-321.

Foram coletados dados de uma estação meteorológica automática existente na própria área de estudo, tais como temperatura do ar instantânea ( $T_{ar}$ , °C); umidade relativa do ar instantânea (UR, %); pressão atmosférica do ar instantânea ( $P_o$ , kPa); velocidade do vento a 10 metros de altura ( $u_{10m}$ ,  $m s^{-1}$ ); radiação solar global diária média ( $R_s$ ,  $24h$ ,  $W m^{-2}$ ) e precipitação (mm). A estação está situada no Instituto Federal do Ceará – *Campus* Iguatu, nas coordenadas: 6° 23' 47" S e 39° 16' 8" W, 233 m, pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As coletas de dados são realizadas a cada hora, com disponibilidade de dados meteorológicos para região em estudo entre o período de 30/05/2007 até os dias atuais.

Na Tabela 1 observa-se a variabilidade temporal da precipitação pluviométrica de acordo com os registros coletados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), em que o maior registro anual foi para o ano de 2008 atingindo precipitação total anual de 1392,8 mm.

Tabela 1 - Precipitação pluviométrica mensal da estação meteorológica automática do INMET no município de Iguatu – CE para os anos estudados na pesquisa.

Meses	Precipitação dos anos estudados (mm)		
	2008	2009	2011
Janeiro	181,4	159,4	220,0
Fevereiro	230,0	186,8	263,8
Março	456,8	115,2	103,6
Maior	369,4	380,8	424,0
Abril	119,0	128,6	125,4
Junho	1,4	14,4	10,6
Julho	11,2	34,4	72,4
Agosto	21,0	56,4	10,6
Setembro	0,0	3,2	0,0
Outubro	0,6	0,0	81,2
Novembro	0,0	0,0	14,8
Dezembro	2,2	0,0	9,2
Total anual (mm)	1392,8	1079,2	1335,6

Na Tabela 2 observa-se também, de acordo com os dados da estação meteorológica automática do INMET, a precipitação pluviométrica acumulada nos 20 dias antecedentes ao imageamento do sensor TM, visto que, os eventos chuvosos antecedentes podem causar uma resposta rápida diante das componentes do balanço de radiação e energia, principalmente, se tratando do bioma Caatinga. Ressalta-se que para a imagem do dia 20/06/2009 observou-se significativas precipitações pluviométricas nos meses anteriores ao seu imageamento, principalmente no trimestre anterior (Tabela 1).

Tabela 2 - Precipitação pluviométrica acumulada na estação meteorológica do município de Iguatu – CE, nos 20 dias antecedentes ao imageamento do sensor TM.

<b>Datas do imageamento</b>	<b>Precipitações pluviométricas (mm)</b>
21/09/2008	0,0
20/06/2009	14,2
29/08/2011	9,8

O estudo foi realizado a partir de três imagens do satélite Landsat 5 de sensor TM (Thematic Mapper), nas respectivas datas de passagem: 21/09/2008, 20/06/2009 e 29/08/2011, as quais foram adquiridas junto ao site americano United States Geological Survey – USGS. As imagens se encontram ortorretificadas, ou seja, imagens cujas coordenadas dos seus milhares de pixels passaram por processo de correção e se aproximam bastante das coordenadas reais da superfície.

Cada imagem do Landsat 5-TM é composta por 7 bandas espectrais entre os comprimentos de onda 0,452-12,42  $\mu\text{m}$ , cujos valores variam de 0 a 256 (8 bits), o que permite assegurar um maior grau de detalhamento das informações a serem geradas, tendo uma resolução espacial de 30 m nas bandas de 1 a 5 e 7, e de 120 m na banda termal 6. O sistema de projeção cartográfica é UTM (Universal Transverse Mercator), DATUM: WGS 1984 na zona 24 S, pela qual está inserida a área de estudo. Possuem órbita/ponto de 217/64.

Para escolha das imagens foram adotados critérios, devido à grande disponibilidade, tais como: a

condição de céu claro, onde o critério de seleção foi a menor ou inexistente presença de nuvens possível, visto que, a sua presença pode superestimar ou subestimar valores na imagem, mesmo que seja em áreas pequenas; utilizou-se imagens pertencentes ao mesmo período do ano, especificamente, para o período seco. Contudo, diante do objetivo da pesquisa, foram utilizadas as bandas de 1 a 7 do sensor TM. O motivo da utilização das referentes bandas, foi devido as mesmas serem semelhantes e por propiciarem à obtenção do balanço de energia à superfície. Esses fatores biofísicos são extremamente importantes, podendo influenciar de forma significativa o balanço de energia à superfície.

Os dados complementares de superfície realizaram correções e calibrações diante das imagens adquiridas mediante o satélite Landsat 5 de sensor TM. Os valores convertidos em radiância espectral e refletância monocromática, possibilitou determinar as componentes do balanço de energia à superfície, onde obteve-se o saldo de radiação ( $R_n$ ), fluxo de calor no solo (G) e latente (LE), bem como a estimativa da fração evaporativa, que possibilitou diante de sua relação a determinação da umidade do solo na zona da raiz proposto pela equação de Scott et al. (2003).

As imagens em estudo foram processadas a partir do software ERDAS imagine na versão 9.1. As cartas temáticas da fração evaporativa e da umidade do solo foram todas processadas pelo software ArcGis® 10.2.2. Inicialmente no ERDAS, foram realizados processos como: empilhamento das bandas e o recorte das imagens empilhadas, seguiu-se com o processamento das imagens na utilização da ferramenta model maker, em que realizou-se as operações matemáticas para cada etapa atribuída a pesquisa, ferramenta indispensável para o processamento das imagens e obtenção dos balanços de radiação e energia, principalmente da fração evaporativa e da umidade do solo.

Na Tabela 3 pode-se observar os dados de entrada no instante da passagem do satélite utilizado na pesquisa, como o dia sequencial do ano (DAS), horário local da passagem (h:min.), ângulo de elevação do Sol (E, graus), temperatura instantânea do ar ( $T_{ar}$ , °C), umidade relativa instantânea do ar (UR, %) e a pressão atmosférica instantânea do ar ( $P_o$ , kPa).

Tabela 3 - Dados de entrada e variáveis no instante da passagem do satélite na estação meteorológica automática empregados no estudo.

Satélite Landsat	Data da Imagem	DAS	Horário (h:min.)	E (graus)	T <sub>ar</sub> (°C)	UR (%)	P <sub>o</sub> (kPa)
5 TM	21/09/2008	265	09:32	59,62	30,2	35	98,99
5 TM	20/06/2009	171	09:36	47,89	26,8	62	98,98
5 TM	29/08/2011	241	09:36	55,74	29,8	37	99,08

Para a estimativa das diferentes componentes do balanço de energia à superfície, utilizou-se o algoritmo SEBAL, desenvolvido por Bastiaanssen et al. (1998), posteriormente aprimorado por Allen et al. (2002). A metodologia empregada seguiu-se basicamente Scott et al. (2003) e Nicácio (2008).

O saldo de radiação instantâneo à superfície ( $R_n$ ,  $W m^{-2}$ ) foi estimado conforme metodologia de vários estudiosos (Bastiaanssen, 1995; Allen et al., 2002; Nicácio, 2008; Arraes et al., 2012; Silva, 2016), Equação 1.

$$R_n = R_{sol\ inc\downarrow} \cdot (1 - \alpha_{sup}) - R_{ol\ emit\uparrow} + R_{ol\ atm\downarrow} - (1 - \epsilon_0) \cdot R_{ol\ atm\downarrow} \quad (1)$$

em que,  $R_{sol\ inc\downarrow}$  é a radiação de onda curta incidente;  $\alpha_{sup}$  é o albedo corrigido de cada pixel;  $R_{ol\ atm\downarrow}$  é a radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção de cada pixel;  $R_{ol\ emit\uparrow}$  é a radiação de onda longa emitida por cada pixel e  $\epsilon_0$  é a emissividade de cada pixel.

O fluxo de calor no solo instantâneo ( $G$ ,  $W m^{-2}$ ) foi obtido segundo a Equação (2) empírica, desenvolvida por Bastiaanssen (2000), que representa valores próximos ao meio-dia solar.

$$G = \left[ \frac{T_s}{\alpha_{sup}} \cdot (0,0038 \cdot \alpha_{sup} + 0,0074 \cdot \alpha_{sup}^2) \cdot (1 - 0,98 \cdot NDVI^4) \right] \cdot R_n \quad (2)$$

em que, NDVI é o índice de vegetação da diferença normalizada. Para efeito de correção dos valores do fluxo de calor no solo para corpos de água, aonde for  $NDVI < 0$  utiliza-se da seguinte expressão:  $G = 0,5 \cdot R_n$ , conforme Allen et al. (2002).

A seguinte etapa é o fluxo de calor sensível instantâneo ( $H$ ,  $W m^{-2}$ ), considerado o processo cerne do SEBAL. Na obtenção de  $H$  com o SEBAL, inicialmente foi necessário ter o conhecimento de dois pixels para ambas imagens, chamados de pixels âncoras (pixels frio e quente), para se determinar a variação de temperatura ( $dT$ ) e a resistência aerodinâmica ao transporte de calor ( $r_{ah}$ ) em todos os

pixels da área de estudo. Esse procedimento pode ser encontrado de forma detalhada nos estudos de Nicácio (2008) e Silva (2016).

O fluxo de calor sensível foi estimado com base na velocidade do vento e na temperatura da superfície, usando uma calibração interna da diferença da temperatura entre dois níveis da superfície (Bastiaanssen et al., 1998; Allen et al., 2002; Arraes et al., 2012; Silva, 2016), conforme Equação 3.

$$H = \rho \cdot c_p \cdot \frac{(a + b \cdot T_s)}{r_{ah}} \quad (3)$$

em que,  $\rho$  é a massa específica do ar ( $kg m^{-3}$ );  $c_p$  é o calor específico do ar à pressão constante ( $1004 J kg^{-1} K^{-1}$ );  $a$  e  $b$  são constantes de calibração da diferença da temperatura ( $T_1 - T_2$ , °C) entre duas alturas ( $Z_1$  e  $Z_2$ , m) e  $r_{ah}$  é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor ( $s m^{-1}$ ).

O fluxo de calor latente instantâneo ( $LE$ ,  $W m^{-2}$ ) compreende o fluxo de massa na atmosfera proveniente da evaporação da superfície do solo mais a evaporação da superfície das folhas da determinada área, ao mesmo tempo em que representa a taxa de calor cedido à água da superfície (solo e/ou planta) para que a mesma evapore.

Uma vez que, conhecidos o saldo de radiação instantâneo ( $R_n$ ), os fluxos de calor no solo ( $G$ ) e sensível ( $H$ ) instantâneos, o  $LE$  foi calculado a partir da Equação 4.

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

em que, todas as componentes do balanço de energia são instantâneas, ou seja, correspondem ao momento da passagem do satélite na área de estudo.

Com o algoritmo SEBAL, foi determinada a fração evaporativa instantânea ( $FE_{inst}$ ), definida pela razão entre o fluxo de calor latente e a diferença entre o saldo de radiação e o fluxo de calor no solo (Bastiaanssen et al., 1998), conforme a Equação 5.

$$FE_{inst.} = \left( \frac{LE}{R_n - G} \right) \quad (5)$$

em que,  $LE$  ( $W\ m^{-2}$ ) é o fluxo de calor latente instantâneo e  $R_n$  ( $W\ m^{-2}$ ) é o saldo de radiação instantâneo.

Para finalização do estudo foi determinado em função da fração evaporativa instantânea à variação espacial e temporal do grau de saturação do solo, referente ao comportamento da umidade do solo em toda a zona da raiz (Scott et al., 2003). O grau de saturação de umidade do solo ( $\theta/\theta_{sat}$ ,  $cm^{-3}\ cm^{-3}$ ) foi estimado conforme a Equação 6.

$$\frac{\theta}{\theta_{sat}} = e^{[(FE_{inst.} - 1,0)/0,42]} \quad (6)$$

em que,  $\theta/\theta_{sat}$  é a umidade volumétrica relativa do solo, permitindo estabelecer uma variação gradual entre solo seco e solo completamente saturado.

Para organização e análise dos resultados, os parâmetros biofísicos foram submetidos a estatística descritiva, tais como os valores mínimo, máximo, média, mediana, moda, desvio padrão e o coeficiente de variação.

### 3. Resultados e discussão

Tabela 4 - Variáveis instantâneas essenciais aos cálculos dos parâmetros biofísicos envolvidos no balanço de energia.

Satélite LANDSAT	Datas das imagens	$d_r$ (-)	Cos Z (-)	$e_a$ (kPa)	$e_s$ (kPa)	W (mm)	$\tau_{sw}$ (-)
5 TM	21/09/2008	0,99	0,86	1,50	4,29	22,89	0,75
5 TM	20/06/2009	0,97	0,74	2,19	3,52	32,37	0,72
5 TM	29/08/2011	0,98	0,83	1,55	4,19	23,60	0,74

A Figura 2 apresenta a variabilidade espaço-temporal da fração evaporativa instantânea (FE), esse parâmetro foi determinado com base nos parâmetros instantâneos do saldo de radiação, fluxo de calor no solo e fluxo de calor latente a partir de dados complementares de superfície mediante o algoritmo SEBAL. A fração evaporativa tem relação direta com a umidade do solo. Em análise geral, pode-se observar variações da FE quanto a análise espaço-temporal nos distintos usos e ocupações do solo, pela qual variou entre 0 e 1 para os diferentes dias de imageamento do sensor TM.

Os pixels em tons azul escuro e na cor mais clara encontraram-se valores expressivos da FE, que correspondem aos corpos hídricos seguido das áreas vegetadas e irrigadas, ressalta-se que para a superfície

Com base nas imagens estudadas, dos referentes dias de imageamento: 21/09/2008, 20/06/2009 e 29/08/2011, e diante da determinação dos parâmetros biofísicos do balanço de energia à superfície, tais como os principais: as estimativas da fração evaporativa e do grau de saturação de umidade do solo, sendo este último o principal objetivo do estudo, foi possível observar as alterações que ocorreram nos distintos usos e ocupações do solo durante o período estudado no município de Iguatu – CE, este inserido no semiárido brasileiro.

A Tabela 4 apresenta as variáveis instantâneas e os seus respectivos valores encontrados a partir das respectivas imagens do satélite Landsat 5-TM. Esses resultados foram essenciais aos cálculos dos parâmetros biofísicos, principalmente nas estimativas da fração evaporativa e do grau de saturação de umidade do solo.

Em um aspecto geral, foram encontrados valores iniciais a partir dos dados de entrada, com isso observa-se na tabela a seguir para cada imagem estudada, o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol ( $d_r$ ); cosseno do ângulo zenital solar (Cos Z); pressão real de vapor d'água atmosférico ( $e_a$ ); pressão de saturação do vapor d'água ( $e_s$ ); água precipitável (W) e a transmissividade atmosférica instantânea no domínio da radiação solar para dias de céu claro ( $\tau_{sw}$ ).

líquida acontece o processo da evaporação, principalmente, destacando-se os reservatórios Trussu (noroeste da imagem) e Orós (nordeste da imagem), onde foram observados os maiores valores. A Figura 2B (20/06/2009) representa melhor esses resultados, que podem ser justificados pelo período de transição da época chuvoso e seca, onde teve maior disponibilidade hídrica. Os meses anteriores ao imageamento foram bastantes chuvosos (Tabela 1), conseqüentemente favorecendo a uma maior retirada de água, assim também como foi observado nos 20 dias antecedentes ao imageamento a ocorrência de precipitação de 14,2 mm (Tabela 2).

Os menores valores da FE foram observados nas áreas de maior atividade antropológica, como nas áreas impermeabilizadas e de solo exposto ou com

pouca vegetação, esses resultados são representados pelas tonalidades em amarelo e, principalmente, na cor vermelha, onde foram observadas com maior frequência no mapa temático da Figura 2A, conforme a análise dos seus resultados foi quem apresentou as áreas com menor evaporação, justificado pelas alterações naturais da região e também pela época seca, onde no mês de imageamento não houve precipitação pluviométrica (Tabela 1), muito menos nos 20 dias antecedentes (Tabela 2) ao próprio dia da passagem do satélite Landsat 5-TM (21/09/2008). Na Figura 2C

observa-se também um padrão espaço-temporal semelhante, entretanto, devido a ocorrência de precipitação pluviométrica de 9,8 mm nos 20 dias antecedentes ao seu imageamento (29/08/2011) e também diante das condições naturais do ambiente, observou-se altos valores da FE nos corpos hídricos e também nas áreas vegetadas e irrigadas. Scott et al. (2003) afirmam que a fração evaporativa está relacionada com a umidade volumétrica do solo através de uma curva de regressão padrão independentemente do tipo de solo e vegetação.

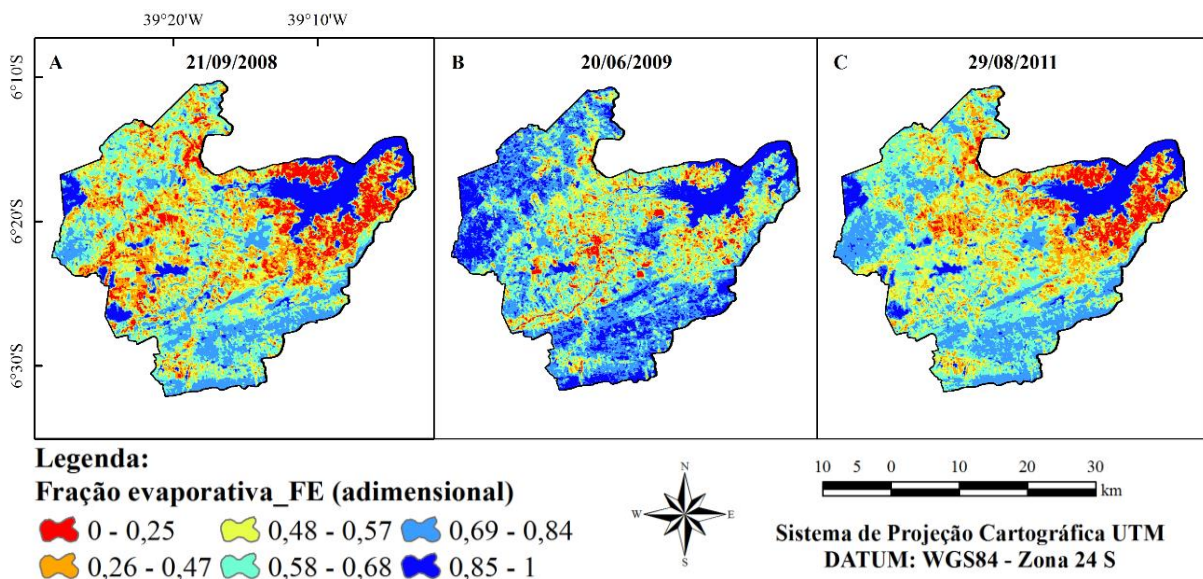


Figura 2 - Mapa temático da distribuição espaço-temporal da fração evaporativa instantânea (FE, adimensional) no município de Iguatu – CE nos dias 21/09/2008 (A), 20/06/2009 (B), 29/08/2011 (C).

Na Figura 3 observa-se a variabilidade espaço-temporal do grau de saturação de umidade do solo ( $\theta/\theta_{sat}$ ), esse parâmetro foi determinado com base na fração evaporativa instantânea (FE) mediante o algoritmo SEBAL. Pode-se observar variações da  $\theta/\theta_{sat}$  diante da análise espaço-temporal nos distintos usos e ocupações do solo, variando entre  $< 0,15$  e  $> 0,56$  para os diferentes dias de imageamento do satélite Landsat 5-TM. Essa variação corroborou basicamente com os resultados de Nicácio (2008) em estudo no semiárido brasileiro para regiões dos estados de Pernambuco e Bahia, onde avaliou e determinou a umidade do solo por sensoriamento remoto e observou que as áreas ocupadas por vegetação nativa apresentaram valores do grau de saturação do solo variando entre 0,35 e 0,55 e valores maiores que 0,55, representando áreas com solo de umidade média a saturados.

Os valores do grau de saturação de umidade deste estudo também corroboraram aos de Lopes et al. (2011), em estudo sobre a espacialização da umidade do solo diante de informações por sensoriamento remoto em uma região semiárida no Rio Grande do Norte, onde observaram de modo geral, que a umidade do solo variou de 0 para as áreas desertificadas e com queimadas, até 0,57 para áreas com vegetação densa.

Em análise geral para este estudo, os pixels com tonalidades verde claro e escuro encontraram-se os maiores valores da  $\theta/\theta_{sat}$ , correspondentes as áreas vegetadas e irrigadas, respectivamente. Nos reservatórios Trussu e Orós são observados os maiores resultados da  $\theta/\theta_{sat}$ , porém ressalta-se que diante da análise do grau de saturação de umidade do solo, esses valores não têm sentido físico. A Figura 3B do dia de imageamento 20/06/2009 apresenta tonalidades mais claras quando comparada com as demais,

possivelmente por possuir maior carga de umidade do solo, diante da observação de áreas mais vegetadas e densas e, também, principalmente em áreas saturadas, à exemplo das áreas irrigadas, esse comportamento é explicado principalmente, por essa data coincidir como a parte final da época chuvosa da região, principalmente por apresentar um trimestre anterior ao seu imageamento muito chuvoso (Tabela 1), e ainda, por observar a ocorrência de precipitação pluviométrica de 14,2 mm nos 20 dias antecedentes a data da imagem estudada (Tabela 2).

As cores em tons em vermelho claro e escuro da figura a seguir são observados os menores resultados da umidade do solo, encontrados em áreas com pouca ou nenhuma vegetação e nas áreas impermeabilizadas da região, respectivamente. Esse comportamento é semelhante aos resultados da fração evaporativa observada anteriormente. Nicácio (2008) observou os valores mais baixos ( $< 0,15$ ) em áreas de solo exposto, situados na região de agricultura.

O dia 21/09/2008 (Figura 2A) conforme pode-se observar no mapa temático possui as cores mais intensas em vermelho, representando as áreas de solo exposto ou impermeabilizadas e também as áreas com

pouca vegetação. Contudo, a baixa umidade para esse fato pode ser explicada por se tratar da época seca e assim se distanciar do período chuvoso da região e também pelas próprias características de alterações naturais, ou mesmo por ações antropológicas na região, favorecendo a degradação do solo e conseqüentemente a possível desertificação desta área, principalmente se tratando das proximidades dos reservatórios Trussu (noroeste da imagem) e Orós (nordeste da imagem), onde foram observados baixos valores. Tal fato teve comportamento semelhante para as demais imagens estudadas (Figura 2B e 2C), devendo atentar-se para tais regiões, visto que à prática agrícola pode estar sendo intensa e, ainda, com um manejo inadequado, favorecendo a degradação de áreas importantes como a mata ciliar existente nas margens desses reservatórios em geral.

A Figura 3C (29/08/2011) também apresentou expressivamente baixa umidade, principalmente as margens do reservatório Orós (nordeste da imagem), entretanto observou-se em seus resultados um aumento do grau de saturação de umidade do solo quando houve precipitação pluviométrica antecedente, que foi de 9,8 mm (Tabela 2).

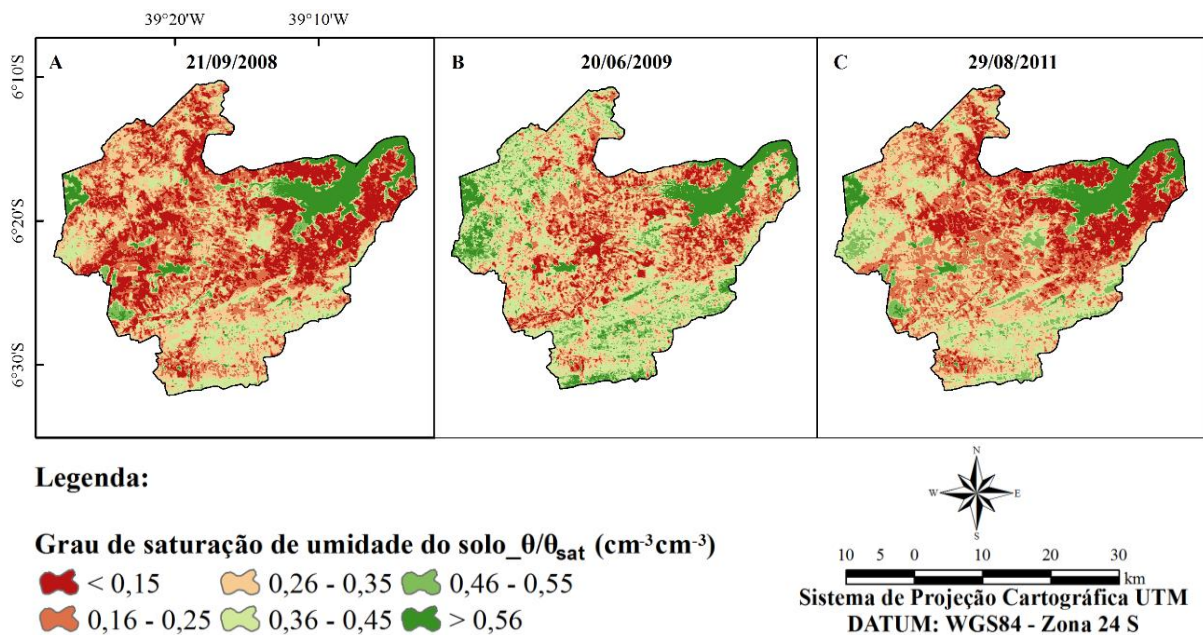


Figura 3 - Mapa temático da distribuição espaço-temporal do grau de saturação de umidade do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) no município de Iguatu – CE nos dias 21/09/2008 (A), 20/06/2009 (B), 29/08/2011 (C).

Portanto, ressalta-se que os significativos aumentos do grau de saturação de umidade do solo estão relacionados aos altos valores da fração

evaporativa, bem como o aumento de ambos estão relacionados com o aumento da precipitação e as próprias alterações naturais do ambiente (Caatinga),

que variam conforme a época do ano. Todavia, a presença expressiva da vegetação (dossel foliar), em virtude da rápida resposta da Caatinga mediante as precipitações antecedentes, passa diretamente a influenciar a umidade do solo. Nicácio (2008) também observou comportamento semelhante, informando em seu estudo que as alterações dos valores de umidade do solo estão relacionadas à redução na intensidade pluviométrica.

Tabela 5 - Análise estatística da distribuição espaço-temporal da fração evaporativa instantânea (FE, adimensional) e do grau de saturação de umidade do solo ( $\theta/\theta_{\text{sat}}$ ,  $\text{cm}^{-3} \text{cm}^{-3}$ ).

Satélite LANDSAT	Datas das imagens	Fração evaporativa instantânea (FE, adimensional)						
		Mín.	Máx.	Médio	Mediano	Moda	DP	CV
5 TM	21/09/2008	0,11	0,99	0,58	0,57	0,99	0,18	0,31
5 TM	20/06/2009	0,37	1	0,69	0,74	0,37	0,17	0,25
5 TM	29/08/2011	0	1	0,62	0,62	0,98	0,17	0,27
Grau de saturação de umidade do solo ( $\theta/\theta_{\text{sat}}$ , $\text{cm}^{-3} \text{cm}^{-3}$ )								
5 TM	21/09/2008	0,09	0,98	0,41	0,36	0,98	0,19	0,46
5 TM	20/06/2009	0,09	0,99	0,52	0,54	0,22	0,19	0,36
5 TM	29/08/2011	0,09	0,99	0,44	0,40	0,97	0,19	0,43

Os valores mínimos observados da FE e principalmente da  $\theta/\theta_{\text{sat}}$  foram encontrados em áreas de solo exposto e nas áreas impermeabilizadas, variou de 0 a 0,37 para a FE e de 0,09  $\text{cm}^{-3} \text{cm}^{-3}$  para a  $\theta/\theta_{\text{sat}}$  em todas as imagens estudadas. Esses valores podem informar alterações ambientais na região, motivadas por ações antrópicas, passivas de degradação ambiental. Lopes et al. (2011) verificaram em regiões do semiárido brasileiro a ocorrência de uma degradação intensa, resultando no aumento da área da região de desertificação.

Nos valores máximos observou-se comportamento semelhante tanto para a FE, que variou entre 0,99 e 1, como para a  $\theta/\theta_{\text{sat}}$ , variando entre 0,98 e 0,99  $\text{cm}^{-3} \text{cm}^{-3}$ , que foram encontrados nas áreas de vegetação nativa da região, e mais expressivamente sobre as áreas irrigadas. Bezerra et al. (2013) também em estudo no semiárido brasileiro sobre áreas irrigadas, estimaram a umidade do solo diante de imagens do Landsat 5-TM e observaram valores em torno de 0 a 0,25  $\text{cm}^{-3} \text{cm}^{-3}$  para a cultura do algodão, evidenciando que a metodologia aplicada neste estudo pode detectar o efeito da irrigação na área determinada, favorecendo na tomada de decisão do processo da irrigação.

Os valores médios observados (Tabela 2) representam melhor a relação desses parâmetros, onde observou o aumento da  $\theta/\theta_{\text{sat}}$  conforme aumentou a FE. Todavia, os valores médios encontrados, destacando-se

Na Tabela 5 estão representados os valores dos parâmetros estatísticos, mínimo (Mín.), máximo (Máx.), médio, mediano, moda, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV), obtidos na análise dos mapas temáticos da fração evaporativa instantânea e do grau de saturação de umidade do solo. São valores coerentes com a literatura que se utilizou de metodologia semelhante a este estudo.

os do grau de saturação de umidade do solo, foram de 0,41, 0,52 e 0,44  $\text{cm}^{-3} \text{cm}^{-3}$ , para os dias 21/09/2008, 20/06/2009 e 29/08/2011, respectivamente.

Para a imagem do dia 20/06/2009 observou-se um aumento mais significativo, devido a relação da precipitação diante das datas estudadas, onde para este observou precipitações antecedentes aos 20 dias da imagem, de 14,2 mm, assim como também, esses eventos chuvosos foram observados com maior frequência no trimestre anterior a esta data, possibilitando uma rápida alteração nos valores de  $\theta/\theta_{\text{sat}}$ , assim como foi também para a FE. Contudo, salienta-se o poder de resiliência da Caatinga, confirmada pela imediata formação da biomassa e dossel foliar, tratada como resposta aos eventos chuvosos (Arraes et al., 2012).

Os valores de CV variaram entre 0,25 a 0,31 para a FE e de 0,36 a 0,43 para a  $\theta/\theta_{\text{sat}}$ . A fração evaporativa apresentou os menores valores de CV quando comparados aos do grau de saturação de umidade do solo na análise espaço-temporal, ou seja, esses resultados distinguem uma maior homogeneidade no padrão de distribuição espacial para a FE, sendo que a  $\theta/\theta_{\text{sat}}$  quando comparado aos valores da FE, apresenta maior variabilidade espacial.

Portanto, foi possível observar a relação entre a fração evaporativa e umidade do solo para o município de Iguatu – CE, com isso foi possível determinar diante

dos seus valores a distribuição espaço-temporal para cada uso do solo. Scott et al. (2003) salientam que essa técnica deve ganhar maior aceitação com os gestores de bacias hidrográficas, agência de recursos hídricos e de irrigação e drenagem, servindo para a tomada de decisões. O monitoramento desses parâmetros biofísicos, principalmente do grau de saturação de umidade do solo mostraram ser parte efetiva do balanço de energia, configurando diante deles o poder na tomada de decisões quanto aos aspectos ambientais de modo geral, conforme Younis e Iqbal (2015), onde concluem que o monitoramento regular da umidade do solo pode ser feito para a gestão da agricultura irrigada e na tomada de decisão. Podendo ser usado também na modelagem hidrológica onde a umidade do solo é tratada como uma componente chave para o processo.

#### 4. Conclusões

A estimativa do padrão espacial do grau de saturação de umidade do solo apresentou valores consistentes para os distintos usos e ocupações do solo, mostrando grande relação com os valores da fração evaporativa instantânea em todas as imagens estudadas do Landsat 5-TM.

A análise dos parâmetros no SEBAL permitiu de modo eficaz o monitoramento dos diferentes usos do solo da região, concluindo-se que nas áreas vegetadas e irrigadas foram observados seus maiores valores do grau de saturação de umidade do solo e nas áreas com pouca ou nenhuma vegetação e áreas impermeabilizadas os menores valores.

#### Referências

- Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R., Waters, R., Bastiaanssen, W., 2002. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land). Advance Training and Users Manual – Idaho Implementation, version 1.0. University of Idaho, Idaho.
- Arraes, F.D.D., Andrade, E.M., Silva, B.B., 2012. Dinâmica do balanço de energia sobre o açude Orós e suas adjacências. *Revista Caatinga* 25, 119-127.
- Arraes, F.D.D., Lopes, F.B., Souza, F.D., Oliveira, J.D., 2009. Estimativa do balanço hídrico para as condições climáticas Iguatu, Ceará, usando modelo estocástico. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada* 3, 78-87.
- Bastiaanssen, W.G.M., 1995. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. A remote sensing approach under clear skies Mediterranean climates. Ph. D. Thesis, Wageningen Agricultural University.
- Bastiaanssen, W.G.M., Molden, D.J., Makin, I.W., 2000. Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. *Agricultural Water Management* 46, 137-155.
- Bastiaanssen, W.G.M., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J.F., Roerink, G.J., Van der Wal, T., 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): Part 2: Validation. *Journal of hydrology* 212, 213-229.
- Bezerra, B.G., Santos, C.A.C., Silva, B.B., Perez-Marin, A.M., Bezerra, M.V.C., Bezerra, J.R.C., Rao, T.V.R., 2013. Estimation of soil moisture in the root-zone from remote sensing data. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 37, 596-603.
- FUNCEME. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 2015. Mapeamento dos espelhos d'água do Brasil. Fortaleza.
- IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará, 2015. Perfil básico municipal de 2015. Iguatu.
- Lopes, H.L., Accioly, L.J.O, Silva, F.H.B.B, Sobral, M.C.M, Araújo Filho, J.C., Candeias, A.L.B., 2011. Espacialização da umidade do solo por meio da temperatura da superfície e índice de vegetação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 15, 973-980.
- Nicácio, R.M., 2008. Evapotranspiração real e umidade do solo usando dados de sensores orbitais e a metodologia SEBAL na bacia do rio São Francisco. Tese (Doutorado). Rio de Janeiro, UFRJ.
- Scott, C.A., Bastiaanssen, W.G., Ahmad, M.U.D., 2003. Mapping root zone soil moisture using remotely sensed optical imagery. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 129, 326-335.
- Silva, J.L.B., 2016. Monitoramento espaço-temporal da cobertura vegetal do bioma Caatinga no Ceará mediante imagens orbitais. Dissertação (Mestrado). Recife, UFRPE.
- Younis, S.M.Z., Iqbal, J., 2015. Estimation of soil moisture using multispectral and FTIR techniques. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* 18, 151-161.