

## MONITORAMENTO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR SENSORIAMENTO REMOTO EM ÁREAS DE AGRICULTURA IRRIGADA NO BRASIL

*Andersson Rodrigues Peter<sup>1</sup>, Anderson Luis Ruhoff<sup>2\*</sup>, Bernardo Barbosa da Silva<sup>3</sup>, Debora Regina Roberti<sup>4</sup>, Lacerda Medeiros Breyer<sup>5\*\*</sup>, Renato Popov dos Santos<sup>5\*\*</sup>*

**Resumo** – A agricultura irrigada é responsável por 47% da retirada de água dos mananciais no Brasil. Nesse contexto, o objetivo do artigo buscou analisar o uso de água pela agricultura irrigada através do processo de evapotranspiração em áreas de clima tropical e subtropical no Brasil. Como metodologia utilizou-se o algoritmo SEBAL/METRIC a partir de imagens dos satélites LANDSAT 5 e 7. A validação foi realizada através da comparação entre dados estimados e observados pelo sistema de correlações de vórtices turbulentos em dois locais distintos. Os erros absolutos e relativos da evapotranspiração diária foram de 0,24 mm (9,1%) em áreas de clima tropical e 0,03 mm (0,5%) em áreas de clima subtropical. Posteriormente, o algoritmo SEBAL/METRIC foi aplicado a outras quatro áreas para analisar o processo em diferentes condições climáticas e de uso da terra. Nas áreas de clima tropical, a agricultura irrigada obteve valores médios absolutos entre 2,5 e 2,9 mm d<sup>-1</sup> (cerrado/pastagens apresentaram valores entre 2,1 e 2,9 mm d<sup>-1</sup>). Em áreas de clima subtropical observaram-se resultados médios absolutos de 5,7 a 6,3 mm d<sup>-1</sup> em agricultura irrigada (campo/pastagens apresentaram valores entre 3,2 a 4,4 mm d<sup>-1</sup>). Concluiu-se que o consumo de água pelo processo de evapotranspiração é maior do que em áreas de vegetação natural, sendo mais expressivo em áreas de agricultura irrigada localizadas em climas subtropicais.

**Palavras-Chave** – Calor latente, LANDSAT, METRIC/SEBAL.

## MONITORING IRRIGATED CROPLAND EVAPOTRANSPIRATION USING REMOTE SENSING IN DIFFERENT CLIMATES IN BRAZIL

**Abstract** – The irrigated cropland is responsible for 47% of water consumption in Brazil. In this context, the main goal of this study was to evaluate the water consumption from irrigated cropland through evapotranspiration in tropical and subtropical climates. The evapotranspiration was estimated using the SEBAL/METRIC algorithm using LANDSAT 5 and 7 images. The estimates were validated using measurements from two micrometeorological towers. The absolute and relative errors of daily evapotranspiration were 0,24 mm d<sup>-1</sup> (9,1%) in tropical climate and 0,03 mm d<sup>-1</sup> (0,5%) in subtropical climate. After the validation process, we ran the SEBAL/METRIC in four other areas to evaluate the evapotranspiration process in different climate and land use and land cover conditions. At the tropical climate areas, the absolute average results of irrigated cropland ranged between 2,5 and 2,9 mm d<sup>-1</sup> (grassland\pastures ranged from 2,1 to 2,9 mm d<sup>-1</sup>). At the subtropical climate areas, the irrigated cropland evapotranspiration ranged from 5,7 to 6,3 mm d<sup>-1</sup> (compared to grassland\pastures class, we found results between 3,2 and 4,4 mm d<sup>-1</sup>). To conclude, the water consumption from evapotranspiration was higher than natural vegetation in both areas, but much higher in irrigated croplands of subtropical climate areas when compared to tropical climates.

**Keywords** – Latent heat, LANDSAT, METRIC/SEBAL.

<sup>1</sup> Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, Brasil.

<sup>2</sup> Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

<sup>3</sup> Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil.

<sup>4</sup> Centro de Ciências Naturais e Exatas, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil.

<sup>5</sup> Instituto de Ciências Biológicas, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.

\* Autor correspondente: [anderson.ruhoff@ufrgs.br](mailto:anderson.ruhoff@ufrgs.br).

\*\* Programa de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (LBA).

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui 12% das reservas mundiais de água doce. A Agência Nacional das Águas (ANA, 2016) considera confortável a situação do país quanto à disponibilidade hídrica, mesmo com 68% desse total concentrado na região Norte. Nesse contexto, o país ainda carece de planejamento e ações que buscassem a otimização dos recursos hídricos (Silva *et al.*, 2011). A agricultura irrigada se destaca entre os principais usos da água, pois é responsável por 47% da retirada dos mananciais e 69% do consumo total no Brasil (ANA, 2016). Associado a isso, a expansão das fronteiras agrícolas e implantação de projetos de irrigação têm contribuído para o aumento da demanda hídrica, principalmente nas regiões Centro-Oeste e Nordeste. Nessas áreas, as irregularidades na precipitação refletem-se diretamente na agricultura (Silva *et al.*, 2005), sobretudo na estação seca. No Sul do Brasil, diferentemente das regiões Nordeste e Centro-oeste onde a sazonalidade é bem definida, os índices pluviométricos apresentam regularidade durante todo o ano. Porém, a ocorrência seguida de secas severas que atingiram o Estado do Rio Grande do Sul causaram grandes prejuízos econômicos e quebras de safras. Segundo Aguiar (2005), das dez safras entre 1995 a 2005 no RS, o fenômeno causou prejuízos significativos aos produtores em sete delas, além da perda de 37,8 milhões de toneladas de grãos nos últimos 20 anos. Colombo e Pessoa (2014) detectaram que o PIB do Estado reduz-se em média 9,2% em anos de secas e estiagens.

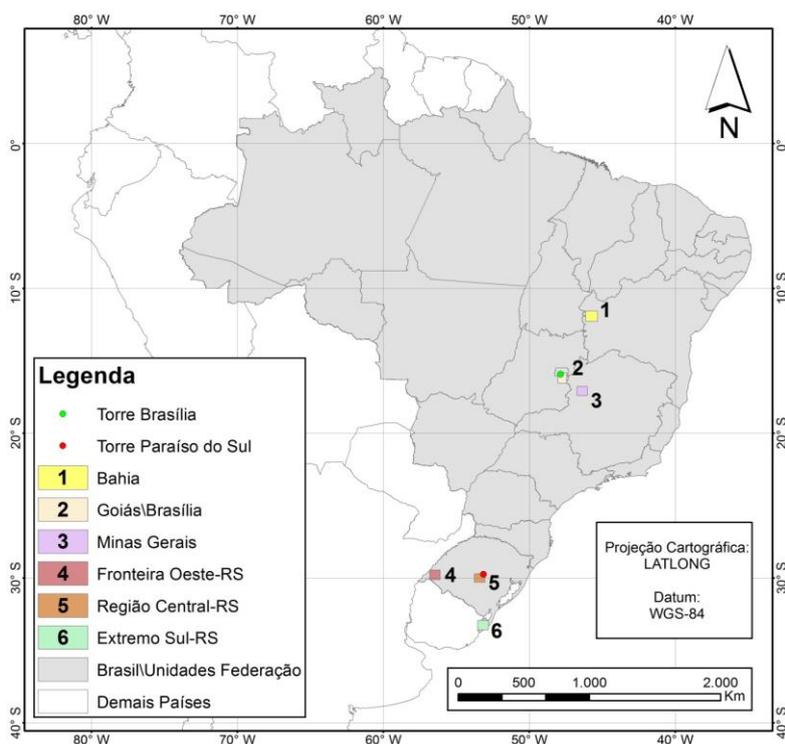
Apesar dos inúmeros benefícios gerados pela irrigação, principalmente quanto à redução das perdas decorrentes da variabilidade climática e de eventos meteorológicos, muitos projetos ainda não consideram os possíveis impactos ambientais e sociais relacionados à utilização da água para irrigação. Nesse contexto, grande parte da água utilizada na irrigação se perde através do processo de evapotranspiração (ET), que é controlado pela disponibilidade de energia, demanda atmosférica e umidade no solo (Novak, 2012). A ET é uma das principais componentes do ciclo hidrológico, sendo sua determinação imprescindível para o planejamento e manejo adequado da agricultura irrigada (Biggs *et al.*, 2015). Usualmente, os métodos de determinação da ET se baseiam nos processos aerodinâmicos turbulentos e no balanço de energia e de massa (Shuttleworth, 2012). Entretanto, essas observações de ET são representativas apenas para as áreas cujas condições sejam similares, não sendo adequadas para estimativas em grandes áreas.

Em função dessas limitações, foram desenvolvidos métodos de estimativas por meio de imagens de sensoriamento remoto, dentre os quais se destacam os algoritmos *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL) (Bastiaanssen *et al.*, 1998) e o *Mapping Evapotranspiration at high Resolution with Internalized Calibration* (METRIC) (Allen *et al.*, 2007). Esses algoritmos determinam o calor latente e a evapotranspiração através do resíduo da equação do balanço de energia, a partir da utilização de imagens multiespectrais e termais combinadas com dados meteorológicos de superfície. Os métodos já foram validados e testados em distintas regiões da superfície terrestre. No Brasil, trabalhos dessa natureza foram amplamente explorados em diversas regiões do país (Ruhoff *et al.*, 2012; Teixeira *et al.*, 2009).

O presente artigo teve como objetivo principal analisar o consumo de água pela agricultura irrigada no processo de ET em áreas de climas tropicais e subtropicais, a partir da modelagem das componentes do balanço de energia utilizando dados de sensoriamento remoto. Os objetivos específicos buscaram: (1) validar as estimativas das componentes do balanço de energia, bem como da ET por meio dos dados observados em estações micrometeorológicas instaladas em Goiás/Brasília (GO/DF) e na região central do Rio Grande do Sul (RS); (2) classificar e mapear o uso e cobertura da terra das áreas selecionadas; e (3) estimar o valor médio da ET para cada classe de uso da terra, comparando os resultados com as estimativas para as áreas irrigadas.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Para monitoramento do processo de ET em áreas de agricultura irrigada, foram selecionadas três áreas de clima tropical e três áreas de clima subtropical (**Figura 1**). As áreas de clima tropical situam-se nos Estados da Bahia (BA), GO/DF, e Minas Gerais (MG), enquanto que as áreas de clima subtropical se localizam no Estado do RS (Fronteira Oeste, Região Central e Extremo Sul). As delimitações priorizaram os cultivos por meio de pivôs centrais (tropical) e inundação contínua (subtropical).



**Figura 1** – Localização das áreas de estudo selecionadas para monitoramento da evapotranspiração por sensoriamento remoto em áreas de agricultura irrigada no Brasil.

As regiões Nordeste e Centro-Oeste apresentam duas estações climáticas bem definidas, com verão chuvoso (outubro a abril), e inverno seco (maio a setembro). Apesar dos baixos índices pluviométricos durante o período de maio a setembro, [Gaspar \(2006\)](#) afirma que o clima regional vem desempenhando papel fundamental para a expansão agrícola, fomentado pela existência de extensos mananciais hídricos superficiais. Durante a estação seca, o cultivo agrícola é realizado por meio do uso intensivo de irrigação. No Estado do RS, os meses de novembro a janeiro são os períodos mais críticos de disponibilidade hídrica, coincidindo com o período em que há o maior uso da água na irrigação. Mesmo apresentando regimes pluviométricos regulares durante todo o ano, as precipitações normais não são suficientes para atender as necessidades hídricas das lavouras agrícolas irrigadas, causando utilização excessiva dos mananciais hídricos.

## 3. METODOLOGIA DE PESQUISA

### 3.1. Utilização de imagens de sensoriamento remoto e validação a partir de medições de ET

Para análise da evapotranspiração em áreas irrigadas, foram selecionadas imagens cujas datas correspondessem ao período de irrigação da soja (clima tropical) e do arroz (subtropical). Na **Tabela 1** são apresentadas as datas e informações das imagens LANDSAT selecionadas. Para validação dos resultados estimados por sensoriamento remoto foram utilizados os dados das torres

micrometeorológicas de Brasília (DF) e Paraíso do Sul (RS). A torre de Brasília se localiza na Reserva Ecológica do Roncador (RECOR-IBGE), administrada pelo Programa de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (LBA-UnB) e pela Fundação Amazônica de Defesa da Biosfera (FDB), cujas coordenadas são: 15°55'51,2''S e 47°52'21.3''W. Está instalada em uma área com o predomínio de vegetação do bioma Cerrado e possui 8,5 m de altura. A torre de Paraíso do Sul foi instalada em uma área do bioma Pampa, sobre um terreno consideravelmente plano e homogêneo (Timm, 2011). Localiza-se nas proximidades do rio Jacuí em uma área de cultivo de arroz irrigado por inundação, nas seguintes coordenadas: 29° 44' 39,6''S e 53° 8' 59,8''W. Os dados de ET observados nas torres foram comparados ao valor médio de uma janela de 3x3 km, sendo o pixel central correspondente às coordenadas de localização da torre, em função de incertezas associadas aos fluxos que ocorrem no entorno do pixel central.

**Tabela 1** – Imagens dos sensores LANDSAT TM e ETM+ utilizadas para determinação da evapotranspiração de áreas agrícolas irrigadas em diferentes condições climáticas no Brasil.

Área de Estudo	Sensor Data	Órbita-Ponto	Horário de aquisição da imagem (Hora local)	Ângulo de elevação solar (°)
Bahia	ETM+ 27/06/2001	220-068	09:56:40	43,10
Goiás\Brasília	TM 08/07/2011	221-071	10:03:54	39,69
Minas Gerais	ETM+ 29/07/2001	220-072	09:58:07	40,97
Fronteira Oeste-RS	TM 31/01/2004	224-081	10:16:06	51,15
Região Central-RS	TM 18/02/2004	222-081	10:03:50	48,20
Extremo Sul-RS	ETM+ 31/12/2000	222-083	10:16:06	57,25

### 3.2. Algoritmo SEBAL/METRIC

Para o processamento dos dados e aplicação do algoritmo SEBAL/METRIC, utilizou-se a metodologia apresentada por Bastiaanssen *et al.* (1998) e Allen *et al.* (2007). O fluxo de calor latente (LE) foi estimado a partir do resíduo do balanço de energia (Equação 1).

$$LE = R_n - G - H \quad (1)$$

onde  $R_n$  corresponde ao saldo de radiação,  $G$  corresponde ao fluxo de calor no solo e  $H$  corresponde ao fluxo de calor sensível. No SEBAL/METRIC, a estimativa do  $H$  é realizada a partir da relação linear entre os valores extremos de temperatura de superfície, que definem o gradiente de temperatura ( $dT$ ). Os pixels frios foram obtidos em corpos d'água ou cultivos agrícolas irrigados em estágio avançado de desenvolvimento, enquanto os pixels quentes foram selecionados em áreas de solo exposto preparadas para o cultivo. A partir do resíduo do balanço de energia, determinou-se a fração evaporativa ( $\Lambda$ ) (Equação 2) e a evapotranspiração diária ( $ET_d$ ) (Equação 3).

$$\Lambda = \frac{LE}{R_n - G} \quad (2)$$

$$ET_d = \frac{\Lambda R_{n24h}}{\lambda} \quad (3)$$

onde  $R_{n24h}$  representa o saldo de radiação diário (conforme metodologia apresentada em Allen *et al.* (2007)) e  $\lambda$  corresponde ao calor latente de vaporização da água (Shuttleworth, 2012).

### 3.3. Classificação de uso e cobertura da terra

A classificação do uso e cobertura da terra foi realizada por meio de um processo automático, através do método de segmentação por crescimento de regiões e do algoritmo de classificação ISOSEG, com limiar de aceitação de 75% e cinco iterações. As classes de uso da terra foram definidas em função das características das áreas de estudo. Nas áreas de clima tropical, os cerrados e pastagens foram agrupados em uma mesma classe devido à similaridade espectral. O mesmo critério foi aplicado às classes cerrado e matas ciliares. Em áreas de clima subtropical, foram agrupadas as classes campo e pastagens e matas nativas e florestamento.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Validação das estimativas de evapotranspiração em áreas de clima tropical e subtropical

Os resultados instantâneos obtidos pelo SEBAL/METRIC são apresentados na **Tabela 2** para as áreas de Brasília-DF e Paraíso do Sul-RS. Observa-se que as estimativas de  $Rn$  e  $Rn_{24h}$  em ambas as torres micrometeorológicas apresentam erros relativos inferiores a 5,5%. Entretanto, nas estimativas de  $H$  ocorreram diferenças significativas quando comparadas aos dados observados. Em Brasília obteve-se subestimativa de  $-113 W m^{-2}$  e em Paraíso do Sul, observou-se superestimativa de  $3 W m^{-2}$ . Na estimativa de  $H$  estão inseridos grande parte dos erros gerados pelo algoritmo. Isso se deve às incertezas e simplificações introduzidas nos cálculos de rugosidade de superfície, resistência aerodinâmica e calibração interna a partir de  $dT$ . As discrepâncias ocorridas em  $LE$ ,  $ET_h$  e  $FE$  apresentaram-se relativamente similares. Na estimativa da  $ET_d$ , os erros relativos foram inferiores a 10%, similares aos encontrados por diversos autores (Teixeira *et al.*, 2009; Folhes, 2008). Mesmo com as discrepâncias obtidas em algumas variáveis do balanço de energia, deve-se ressaltar a habilidade do algoritmo em estimar a  $ET_d$  em diferentes condições climáticas e de uso e cobertura da terra, o que garante a confiabilidade espacial das estimativas.

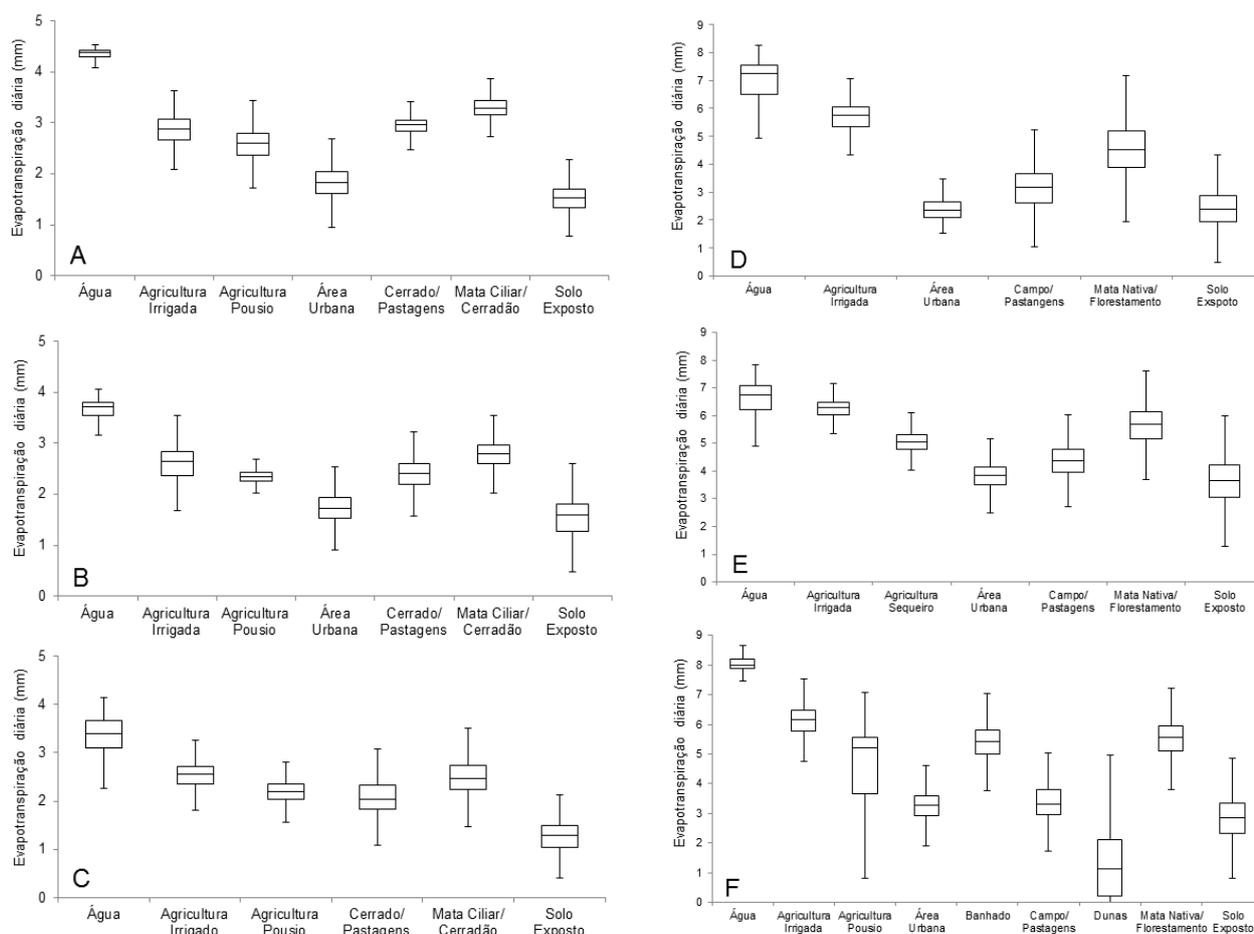
**Tabela 2** – Comparação dos valores estimados e observados do balanço de energia e evapotranspiração nas estações micrometeorológicas de Brasília (DF) e Paraíso do Sul (RS).

Variável	Brasília (DF) - Cerrado				Paraíso do Sul (RS) – Agricultura irrigada			
	Valor Estimado	Valor Observado	Erro Absoluto	Erro Relativo (%)	Valor Estimado	Valor Observado	Erro Absoluto	Erro Relativo (%)
$Rn$ ( $W m^{-2}$ )	444	421	23	5,4	537	553	-16	-2,9
$Rn_{24h}$ ( $W m^{-2}$ )	111	115	4	3,6	182	191	-9	-4,9
$G$ ( $W m^{-2}$ )	32	5	27	515,0	38	-12	50	-425,8
$H$ ( $W m^{-2}$ )	91	204	-113	-55,2	69	66	3	5,0
$LE$ ( $W m^{-2}$ )	321	252	69	27,6	430	354	76	21,4
$ET_h$ ( $mm h^{-1}$ )	0,47	0,37	0,10	26,7	0,63	0,52	0,11	21,4
$FE$	0,78	0,60	0,18	28,8	0,86	0,63	0,23	37,3
$ET_d$ ( $mm d^{-1}$ )	2,92	2,68	0,24	9,1	5,80	5,77	0,03	0,5

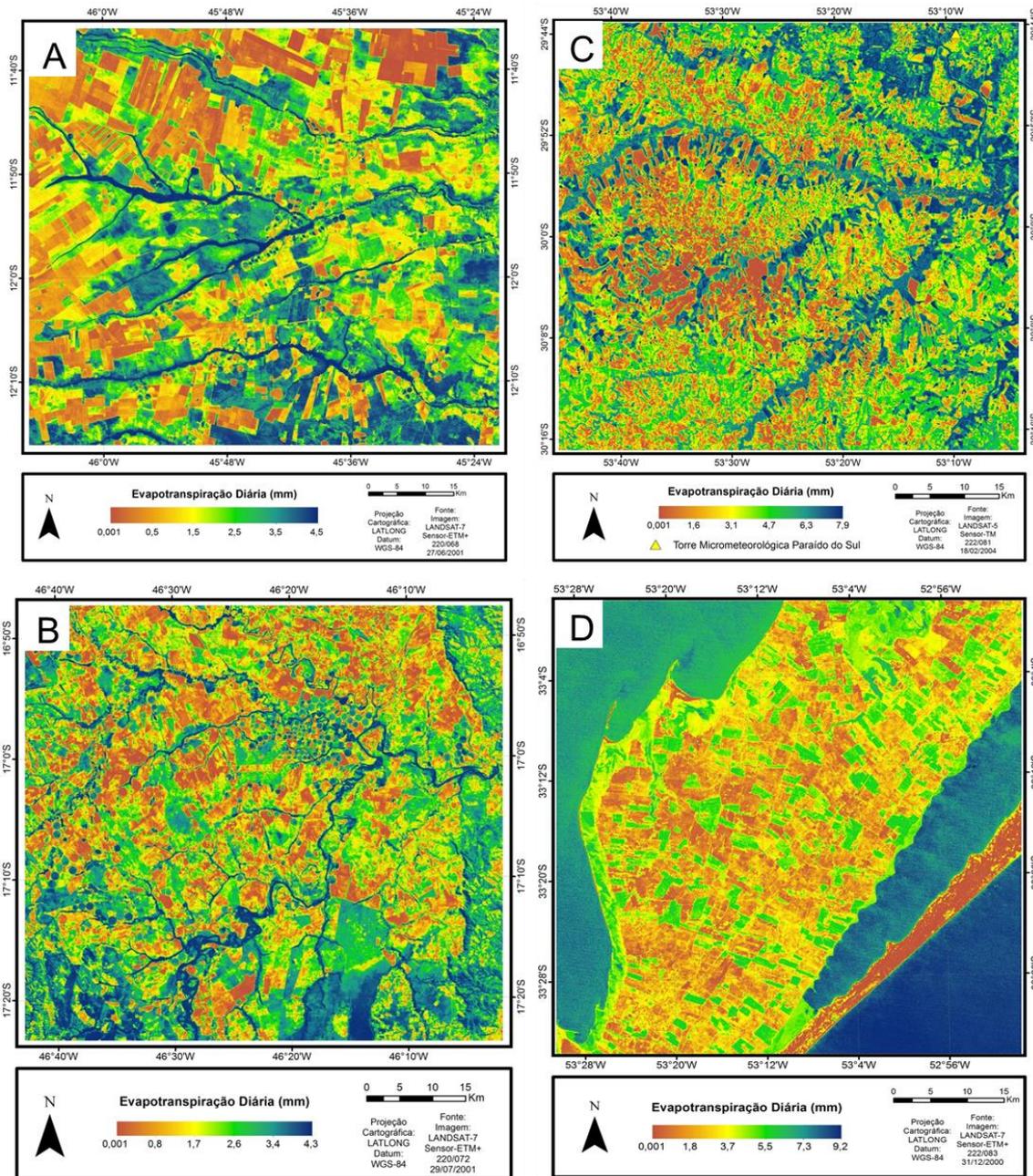
## 4.2. Estimativas de evapotranspiração em áreas de clima tropical e subtropical

As médias de evapotranspiração diária por classe de uso e cobertura da terra são apresentadas na **Figura 2**, para as áreas de clima tropical e subtropical. Nas áreas de clima tropical observa-se que as classes água, mata ciliar/cerradão e agricultura irrigada apresentaram os maiores valores médios de  $ET_d$  (2,5 a 4,1mm), enquanto as classes cerrado/pastagens e agricultura de pousio apresentam valores intermediários (2,1 a 2,9mm). Os menores em valores ocorrem em área urbana e de solo exposto (1,3 a 1,8mm). Em áreas de clima subtropical, as áreas de água apresentaram os maiores valores médios de  $ET_d$ , variando entre 6,5 e 8,0mm. As áreas de agricultura irrigada apresentaram valores entre 5,6 a 6,2mm, sendo superiores a às áreas de banhado, agricultura de sequeiro e mata nativas/silvicultura, que apresentaram valores médios diários entre 4,5 a 5,6mm nas três áreas.

A variabilidade espacial da ET diária é apresentada na **Figura 3** em áreas de clima tropical e subtropical. De uma maneira geral, as áreas em tons laranja e amarelo apresentam baixas taxas de ET e baixos índices de disponibilidade hídrica, enquanto áreas em tom verde apresentam valores intermediários e áreas em tom azul escuro apresentam altas taxas de ET, consideradas como áreas muito úmidas. Observa-se que as áreas de matas ciliares, banhados e áreas de agricultura irrigada apresentam padrão espacial distinto das demais classes de uso da terra.



**Figura 2** – Estimativas de evapotranspiração por sensoriamento em diferentes condições climáticas e de uso da terra no Brasil. Localização das áreas de clima tropical: A) Bahia; B) Goiás/Brasília; C) Minas Gerais. Localização das áreas de clima subtropical no Rio Grande do Sul: D) Fronteira Oeste; E) Região Central; F) Extremo Sul.



**Figura 3** – Variabilidade espacial da evapotranspiração diária estimada por sensoriamento em diferentes condições climáticas e de uso da terra no Brasil. Localização das áreas de clima tropical: A) Bahia; B) Minas Gerais. Localização das áreas de clima subtropical no Rio Grande do Sul: C) Região Central; D) Extremo Sul.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia empregada possibilitou a análise da *ET* em diferentes classes de uso e cobertura da terra, demonstrando a viabilidade das estimativas por sensoriamento remoto. Destaca-se a sensibilidade do algoritmo em discernir a disponibilidade hídrica em diferentes condições climáticas. Comparando-se o resultado de áreas de agricultura irrigada às condições naturais, observou-se que em áreas os tropicais valores médios de *ET* se aproximaram aos encontrados em áreas de cerrado e pastagens, com diferenças de até 20%. Entretanto, nas áreas de clima subtropical, a *ET* ficou muito acima das áreas de vegetação natural, com diferenças entre 43% a 78%. Essa

diferença acentuada pode ser explicada pelo método de irrigação por inundação, no qual a lâmina d'água cobre o solo por um longo período, bem como pela maior disponibilidade de energia em função do período de irrigação (meses de verão). Para concluir, a metodologia empregada pode ser utilizada para um adequado planejamento e gestão de recursos hídricos, principalmente para subsidiar as etapas de planejamento agrícola, além de fornecer informações importantes para os comitês de bacias hidrográficas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. (2016) *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: Informe 2016*. Brasília, DF: ANA.
- AGUIAR, R. (2005) Estiagem: como conviver com esse fenômeno? *Extensão Rural e Desenvolvimento Sustentável* 1 (4), pp. 11–14.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. (2007) Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 133, pp. 380–394.
- 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. *Journal of Hydrology* 212-213, pp. 198–212.
- BIGGS, T.; PETROPOULOS, G. P.; VELPURI, N. M.; MESSINA, A. Remote Sensing of Evapotranspiration from Croplands. In: THENKABAIL, P. (2015) *Handbook of Remote Sensing*. Taylor-Francis.
- COLOMBO, J. A.; PESSOA, M. L. (2014). *Impacto econômico dos eventos de estiagem: evidências a partir dos municípios do Rio Grande do Sul*. Fundação de Economia e Estatística.
- FOLHES, M. T. (2007) *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.
- GASPAR, M. T. P. (2006) *Sistema aquífero Urucuia: caracterização regional e propostas de gestão*. Tese (Doutorado em Geologia). Universidade de Brasília.
- NOVÁK, V. (2012) *Evapotranspiration in the soil-plant-atmosphere system progress in soil science*. Springer-Verlag.
- RUHOFF, A. L.; PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; ARAGAO, L. E. O. C.; ROCHA, H. R.; MALHI, Y. (2012) A MODIS-Based Energy Balance to Estimate Evapotranspiration for Clear-Sky Days in Brazilian Tropical Savannas. *Remote Sensing* 4, pp. 703-725.
- SHUTTLEWORTH, J. W. (2012) *Terrestrial Hydrometeorology*. Wiley-Blackwell.
- SILVA, B. B.; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C. (2011) Balanço de radiação no perímetro irrigado São Gonçalo – PB mediante imagens orbitais. *Revista Caatinga* 24(3), pp. 145–152.
- SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. (2005) Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens LANDSAT 5 – TM. *Revista Brasileira de Meteorologia* 20(2), pp. 243–252.
- TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; AHMAD, M. D; BOS, M. G. (2009) Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil Part A: Calibration and validation. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, pp. 462-476.
- TIMM, A. U. (2011) Estimativa dos fluxos de energia superficiais utilizando o modelo de superfície NOAH modificado para culturas alagadas. Tese (Doutorado em Física). Universidade Federal de Santa Maria.