

## **AVALIAÇÃO DE SÉRIES TEMPORAIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM BACIA COM INTENSA ATIVIDADE AGRÍCOLA NO SUL DO BRASIL**

*Rafael Henrique Bloedow Kayser<sup>1</sup>; Anderson Luis Ruhoff<sup>2</sup> & Elisa Kich<sup>3</sup>*

**RESUMO** – Este trabalho apresenta uma análise espaço-temporal da evapotranspiração (ET) na bacia hidrográfica do rio Vacacaí, Estado do Rio Grande do Sul, a partir de imagens Landsat e do modelo SEBAL com calibração automática dos pixels âncora. A bacia do rio Vacacaí insere-se no contexto do bioma pampa, região caracterizada por possuir altas taxas de consumo de água ocasionada pelo cultivo da lavoura irrigada do arroz, historicamente o principal cultivo da região, mas que viu nos últimos anos um incremento maciço da lavoura de soja, cultivada em sequeiro. Gerou-se séries mensais e sazonais de ET de 2000 a 2018, onde se verificou uma relação bastante direta com o regime pluviométrico da região. Analisando-se o ciclo sazonal da irrigação, entre dezembro e fevereiro, verificou-se que a média da ET diária em dias de céu claro nas áreas irrigadas neste período é de 5,12 mm/dia, havendo uma redução média de 15% na ET nos ciclos com os menores índices de chuva. Em relação às possíveis alterações das taxas de ET na bacia frente ao incremento da soja, não foram constatadas alterações significativas, uma vez que o regime de ET entre as duas classes de ocupação do solo é bastante similar.

**ABSTRACT**– This work presents a spatio-temporal estimation of evapotranspiration (ET) in Vacacaí river basin, using Landsat images and SEBAL model with automatic calibration of anchor pixels. The Vacacaí river basin is part of the Pampa biome, a region characterized by high rates of water consumption caused by irrigated rice cultivation, historically the main crop in the region, but which has seen a massive increment of rainfed soybean crops. Monthly and seasonal ET series were generated from 2000 to 2018, where there was verified a direct relationship with the temporal distribution of rainfall in the basin. Analyzing the seasonal irrigation cycle between December and February, it was verified that the average daily ET in irrigated areas in this period is 5.12 mm/day, with an average reduction of up to 15% in ET in cycles with the lowest rainfall rates. In relation with the possible alterations of ET rates in the basin caused by the rainfed soybean increment, no significant changes were observed, once the ET regime between grassland and rainfed soybean is very similar over a year.

**Palavras-Chave** – evapotranspiração, SEBAL, agricultura

### **1. INTRODUÇÃO**

O setor agrícola é responsável atualmente pela maior parcela da água consumida no mundo. Globalmente, 1,5 bilhão de hectares de terra cultivada (irrigada e de sequeiro) cobrem cerca de 10% da superfície terrestre do planeta. Cerca de 80% do consumo de água doce por humanos é usado para a agricultura irrigada, a qual produz 45% do suprimento mundial de alimentos de 25% das terras cultiváveis do mundo (THENKABAIL et al., 2010).

---

<sup>1</sup> Doutorando – Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Email: rafael.hbkayser@gmail.com

<sup>2</sup> Professor adjunto – Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Email: andersonruhoff@gmail.com

<sup>3</sup> Mestra - Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Email: elisakich@gmail.com

Num contexto cada vez mais crescente de mudanças climáticas, onde a tendência é de que os extremos de disponibilidade hídrica sejam cada vez mais comuns, é essencial que se conheçam as áreas de consumo de água no setor agrícola e que possa haver alguma forma de mensurar o volume de água utilizado, de forma a proporcionar políticas eficientes de controle, adoção de práticas de eficiência no uso da água e também se possa conhecer seus impactos no ciclo hidrológico. A evapotranspiração (ET) é o processo capaz de quantificar o consumo hídrico das plantas, e o sensoriamento remoto é a tecnologia reconhecida como a solução mais viável para obtenção de estimativas de ET em escala espaço-temporal e acurácia adequadas para diversos tipos de aplicações (BIGGS et al., 2015).

No contexto de estimativa de ET em áreas agrícolas por sensoriamento remoto, é preciso levar em consideração ao menos dois aspectos. O primeiro diz respeito à escolha do modelo a ser utilizado, uma vez que não existem produtos capazes de medir diretamente a ET. A evapotranspiração pode ser estimada a partir de dados provenientes de sensores ópticos e termais. Os modelos de balanço de energia de fonte única são frequentemente utilizados em aplicações agrícolas, como o SEBAL (BASTIAANSEN et al., 1998), e o METRIC (ALLEN et al., 2007).

Outro aspecto a ser considerado é a utilização de um produto de sensoriamento com uma resolução espacial compatível com a escala do uso ou ocupação predominante na paisagem. Em termos de áreas agrícolas, uma unidade cultivada pode variar de centenas (10 por 10 m) e milhares (100 m por 100 m) de metros quadrados. Dessa forma, a coleção Landsat é bastante indicada em estudos que envolvam a estimativa de ET em áreas agrícolas, além da possibilidade de obtenção de séries de dados desde a década de 1980.

A maioria das políticas e dos estudos voltados ao consumo de água são voltados à agricultura irrigada, embora a agricultura de sequeiro seja predominante, e que de alguma forma também impacta o ambiente e o ciclo hidrológico. Estudos recentes, como o de DIAS et al., (2015) demonstraram que a conversão de vegetação natural para agricultura está acarretando na alteração das componentes do balanço hídrico em pequenas bacias da Amazônia e do Cerrado, com uma diminuição em torno de 40% na evapotranspiração.

A região do bioma Pampa, localizada no extremo sul do Brasil, é historicamente caracterizada pela predominância da agricultura irrigada através do cultivo do arroz por inundação. Diversos relatórios da Agência Nacional de Águas apontam esta região como sendo uma das mais críticas em termos de balanço hídrico, não pela baixa disponibilidade hídrica, mas sim pela alta demanda, acarretada majoritariamente pela agricultura irrigada. Por outro lado, nos últimos anos houve um incremento substancial da lavoura de soja na região, cultivada em sequeiro, sendo atualmente a principal cultivo da região. Os impactos no ciclo hidrológico frente à alteração da paisagem, antes

dominada por formações campestres, para o cultivo da soja em sequeiro, ainda são pouco conhecidos. A bacia do rio Vacacaí, localizada na porção central do estado do Rio Grande do Sul, pode ser considerada uma amostra do que está ocorrendo no bioma Pampa como um todo. Portanto, o objetivo deste trabalho é avaliar a variação espaço-temporal da evapotranspiração na bacia do rio Vacacaí no Rio Grande do Sul, tendo como foco principal as áreas irrigadas e verificando possíveis alterações frente ao incremento da soja sobre a formação campestre nativa da região.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Vacacaí-Vacacaí Mirim está localizada na porção centro-ocidental do Estado do Rio Grande do Sul, possuindo uma área total de 11.077 km<sup>2</sup> (Figura 1). Num contexto maior, é parte da Região Hidrográfica do Guaíba, sendo um dos formadores do rio Jacuí. Também é parte integrante do bioma pampa, compreendido por formações campestres em sua maior extensão, além de florestas semi-decíduais ao longo das planícies e várzeas dos principais rios.

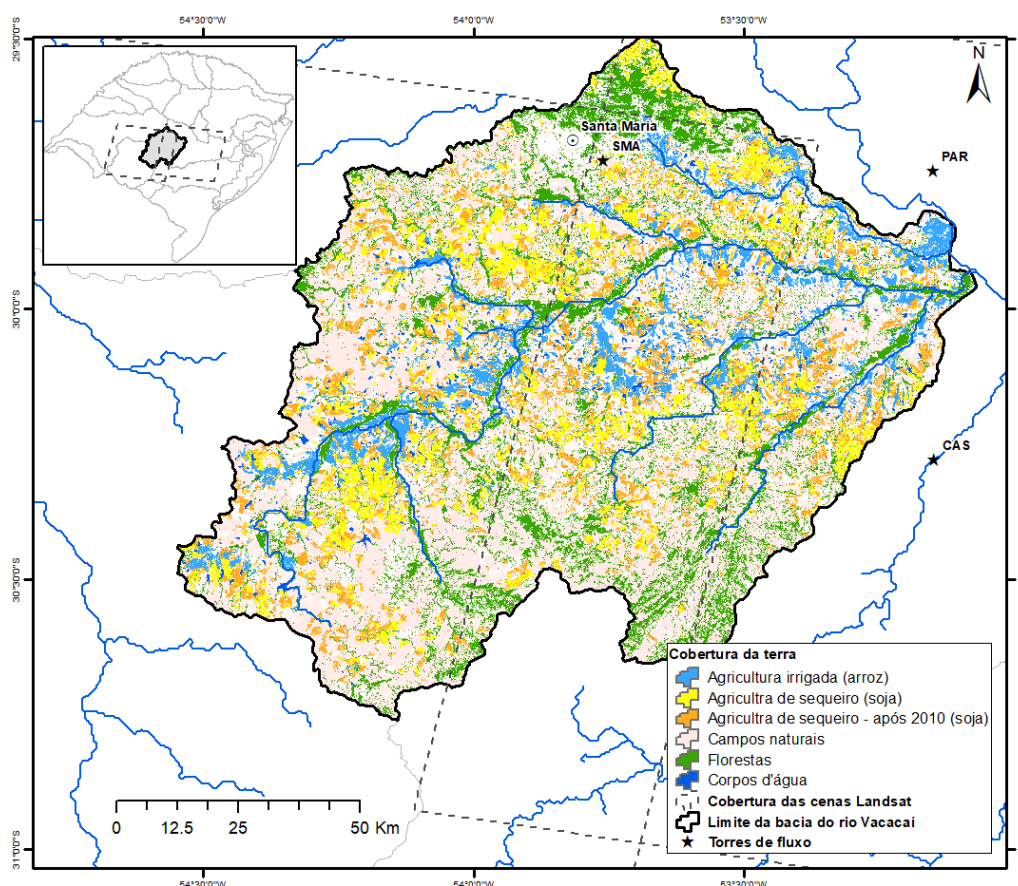


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.

Historicamente, tanto na bacia como em toda a região do bioma pampa, predominou-se o cultivo do arroz irrigado devido às condições favoráveis do solo e disponibilidade hídrica. No entanto, a partir do ano 2000, houve um incremento bastante significativo da cultura da soja, cultivada em sequeiro, passando a ser principal cultivo na bacia (Figura 2.a). A partir de 2011 houve outro salto

expressivo, passando a ser a paisagem predominante na área de estudo no ano de 2017 de acordo com o mapeamento realizado pelo MapBiomias (Figura 2.b). A Figura 1 ainda apresenta um mapa de cobertura da terra da bacia, mesclando informações obtidas do projeto MapBiomias com metodologias para mapeamento de áreas agrícolas descritas em KAYSER (2019) e aprimoradas no presente trabalho.

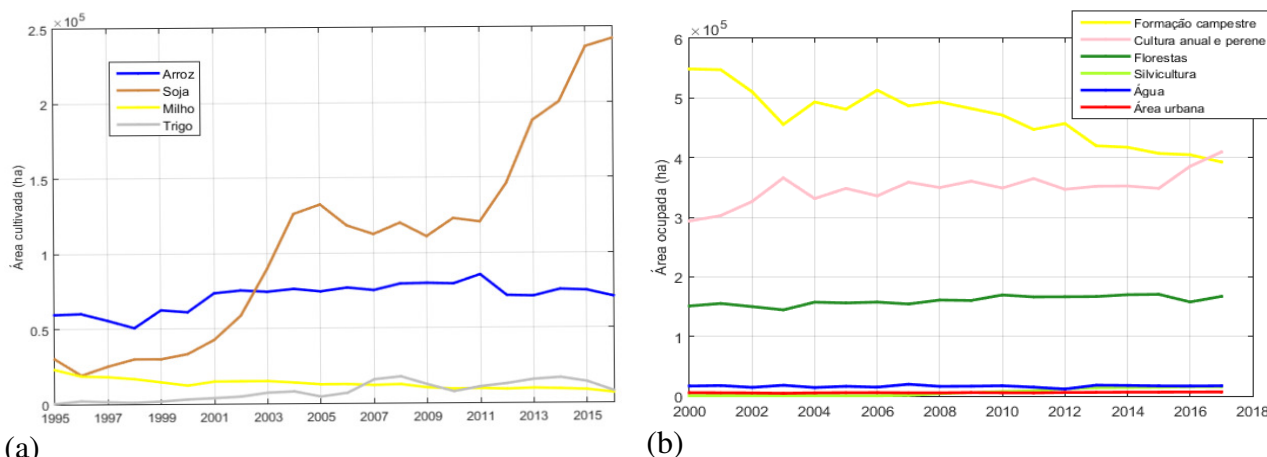


Figura 2 – Evolução da cobertura da terra na bacia do rio Vacacaí: a) séries anuais de área cultivada das principais culturas da bacia obtidas por censo agropecuário (IBGE), e b) séries anuais de uso e cobertura da terra obtidas por classificação de imagens de satélite (MAPBIOMAS).

## 2.2. Mapeamento das áreas agrícolas

Existem poucos trabalhos específicos que se propõem ao mapeamento de áreas agrícolas a nível anual, ou mais especificamente ao mapeamento de áreas irrigadas. Produtos como o do MapBiomias, apesar de bastante completos, não são voltados exclusivamente à área agrícola, tendo uma acurácia ruim ao ser comparado com dados de censo agropecuário. Nesse sentido, KAYSER (2019) propôs uma metodologia para definição de áreas agrícolas em todo o bioma pampa valendo-se das diferenças sazonais verificadas nos índices de vegetação e definindo limiares para a distinção da agricultura a partir do desvio padrão resultante de uma série temporal de imagens coletadas em um ciclo de safra. Neste trabalho, deu-se continuidade a esta metodologia, explorando-se diferenças fenológicas entre a soja e o arroz que ocorrem no período de entressafra, para que assim seja possível fazer a distinção entre as duas culturas.

## 2.3. Descrição do algoritmo SEBAL, calibração dos pixels âncora e utilização de produtos de reanálise como dado de entrada

Neste trabalho foi utilizada uma versão do modelo SEBAL (BASTIAANSEN et al., 1998), incluindo um procedimento de calibração automática dos pixels âncora a partir do algoritmo CIMEC (ALLEN et al., 2013). Estudos iniciais entre o acoplamento do SEBAL com o CIMEC, incluindo análises de sensibilidade dos parâmetros meteorológicos de entrada foram desenvolvidos por KICH (2018). Dentre as limitações verificadas, destacam-se a necessidade de obtenção e manipulação de um grande volume de dados para a geração de séries extensas de ET, além da necessidade de obtenção

de dados de temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e saldo de radiação diária, onde na maioria das aplicações inexistem dados observados *in situ*.

Nos últimos anos houve um crescimento bastante significativo da chamada computação em nuvem aplicada ao sensoriamento remoto, no qual permite a utilização, análise e processamento destes produtos a partir de grandes servidores externos, sem a necessidade de download dos dados de entrada, como a plataforma Google Earth Engine (GORELICK et al., 2017). Nesse sentido, está sendo desenvolvida uma nova versão do modelo SEBAL em ambiente de computação em nuvem a ser aplicado no presente trabalho (KAYSER et al, *in prep.*). Também está sendo avaliada a acurácia do modelo frente à utilização de dados meteorológicos de entrada provenientes de produtos de sensoriamento remoto, como o GLDAS, um produto de reanálise que combina dados observados *in situ* e modelos atmosféricos.

Em suma, o SEBAL calcula o fluxo instantâneo de ET como sendo o residual do balanço de energia superficial, dado pela seguinte equação:

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

Onde  $LE$  é o fluxo de calor latente,  $R_n$  é o fluxo do balanço de radiação na superfície,  $G$  é fluxo de calor no solo e  $H$  é o fluxo de calor sensível ( $W/m^2$ ).

O  $R_n$  é obtido a partir do balanço de radiação, considerando as parcelas de radiação incidente e refletida. Neste processo, são utilizadas variáveis como o albedo, índices de vegetação extraídos das bandas ópticas, além de dados meteorológicos como temperatura do ar e umidade relativa.

O principal esquema do SEBAL está na obtenção do fluxo de calor sensível, sendo a taxa de calor perdida para o ar devido à diferença de temperatura. O calor sensível é função do gradiente de temperatura ( $dT$ ), da rugosidade superficial ( $r_{ah}$ ) e da velocidade do vento ( $u_x$ ). Uma vez que  $r_{ah}$  e  $dT$  são desconhecidos, adota-se um esquema iterativo e a utilização de dois pixels âncora que melhor possam representar as condições extremas do gradiente de temperatura.

Na versão original do modelo SEBAL, a obtenção dos pixels âncora é feita de forma manual, através da seleção de condições características de pixels frios, como áreas de agricultura irrigada, e de pixels quente, como solos expostos. Por ser um procedimento bastante trabalhoso, desde então vem sendo desenvolvidas alternativas para a obtenção dos pixels âncora, com destaque para o esquema CIMEC, proposto em (ALLEN et al., 2013), o qual consiste na adoção de percentis de NDVI e temperatura de superfície (LST), de modo a obter uma subpopulação de pixels candidatos. Tanto para o pixel frio quanto para o pixel quente, são definidos percentis de NDVI e LST, resultando na adoção de dois parâmetros para cada pixel, podendo ser adotado os valores definidos no texto original, ou então calibrados, uma vez que causam uma certa sensibilidade na definição da ET. Uma vez obtidas todas as variáveis da equação (1), o próximo passo é a obtenção da fração evaporativa ( $FE$ ),

dada pela razão entre o calor latente e a diferença entre o saldo de radiação instantâneo e o fluxo de calor no solo. A fração evaporativa pode ser considerada constante ao longo de um dia, e será utilizada no cálculo da ET diária a partir da seguinte equação:

$$ET_{24h} = \frac{FE \cdot Rn_{24h}}{\lambda} \quad (2)$$

Sendo  $Rn_{24h}$  o saldo de radiação diário e  $\lambda$  correspondente ao calor latente de vaporização da água. O saldo de radiação diário difere do saldo de radiação instantâneo extraído do Landsat, uma vez que deve representar a condição ao longo de um dia. Esta variável pode ser obtida através de dados medidos in situ ou então a partir de produtos de sensoriamento que possuam uma resolução temporal na escala de horas, como o produto de reanálise GLDAS.

#### **2.4. Validação do modelo a partir das torres de fluxo**

A bacia do rio Vacacaí e seu entorno conta com três torres de fluxo instaladas e monitoradas pelo projeto denominado Rede Sulflux, da Universidade Federal de Santa Maria. Duas torres foram instaladas em área agrícola irrigada (CAS – Cachoeira do Sul e PAR – Paraíso do Sul) e uma instalada em área de campos naturais (SMA – Santa Maria). A figura 1 apresenta também a localização destas torres. Maiores informações a respeito das torres e do processo de análise de consistência dos dados podem ser obtidos em SOUZA et al. (2018) e RUBERT (2017).

#### **2.5. Seleção das imagens Landsat e geração das séries temporais**

De acordo com a Figura 1, a área da bacia do rio Vacacaí é coberta por pelo menos duas cenas do sensor Landsat (222/81 e 223/81). Foram selecionadas todas as imagens da coleção Landsat desde o ano 2000 até 2018, considerando um limite de cobertura de nuvens por imagem de até 20%. Foi definido o ano 2000 como ponto de partida devido ao fato de que o produto GLDAS utilizado como fonte de dados meteorológicos possui dados apenas após este período.

Desde o ano 2000, foram selecionadas uma média de 25 imagens ao ano para a aplicação do modelo. A partir dos mapas de ET por imagem, foram geradas composições mensais, além de uma composição incluindo os meses de pico das safras de verão, entre dezembro e fevereiro. Para cada cobertura de interesse de uso do solo (i. e., agricultura irrigada, agricultura de sequeiro, áreas de transição, campos naturais, floresta e corpos d'água), foram extraídas as médias e os desvios padrões mensais e por ciclo, além da média mensal para toda a bacia.

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

#### **3.1. Mapeamento das áreas de agricultura irrigada e de sequeiro**

A Figura 3 apresenta o resultado da classificação interanual das áreas de arroz e soja através da variação temporal dos índices de vegetação. Obteve-se um erro médio das áreas mapeadas de arroz entre os anos de 2000 e 2016 em torno 8%, e para a soja, este índice subiu para 31%.

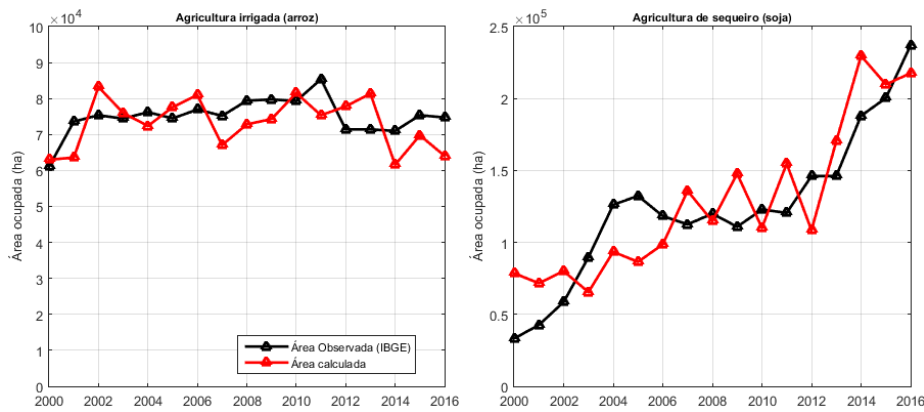


Figura 3 – Resultado da classificação interanual das áreas de arroz e soja.

Para a extração dos dados de ET, utilizou-se um único mapa para toda a série, agregando-se os pixels com maior frequência de classificação entre as duas culturas. Para a soja, dividiu-se a classificação em duas categorias, uma com as áreas classificadas como soja até 2010, e a segunda com as novas áreas classificadas a partir deste período. Realizou-se uma composição destas classes com o mapeamento das áreas de campos, florestas e corpos d'água realizada pelo Mapbiomas. O resultado desta composição é apresentado na Figura 1.

### 3.2. Validação do modelo SEBAL a partir das torres de fluxo

O processo de validação do modelo SEBAL a partir das torres de fluxo e da acurácia obtida utilizando o produto GLDAS como dado de entrada em alternativa aos dados meteorológicos observados será apresentada em KAYSER et al., (*in prep.*) e não será foco do presente trabalho. Em suma, a Figura 4 apresenta os principais resultados obtidos, comparando os dados observados de ET com a saída do modelo SEBAL obtida a partir de dados observados e provenientes do produto GLDAS. A raiz do erro médio quadrático total para a versão SEBAL com dados observados foi de 0,87, e utilizando o produto GLDAS o erro passou para 1,04, concluindo-se que o produto de reanálise pode ser utilizado para geração de séries de ET, sem perda significativa da acurácia dos resultados.

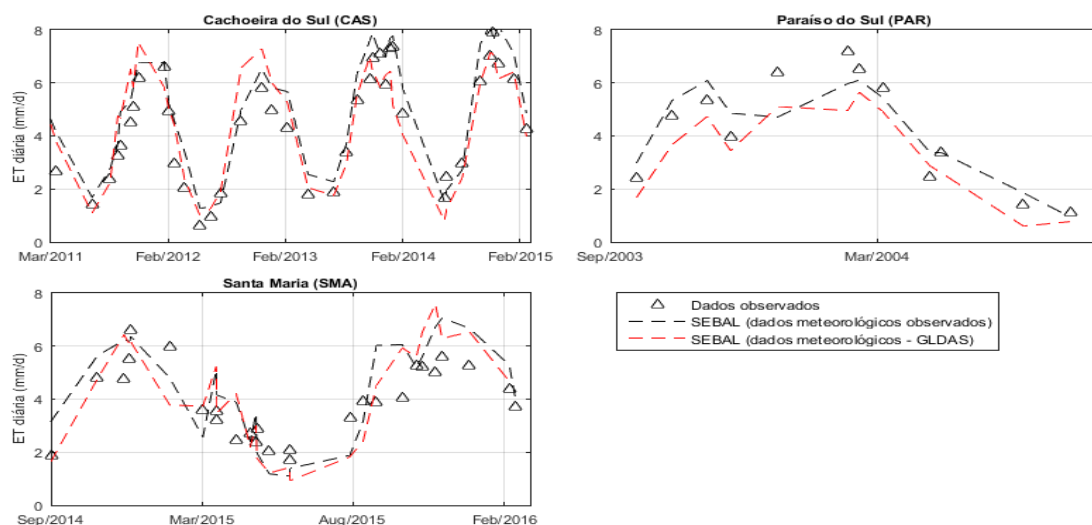


Figura 4 – Validação do modelo SEBAL a partir das torres de fluxo considerando o cenário utilizando dados meteorológicos observados in situ e obtidos a partir do sensor GLDAS.

### 3.3. Análise das séries temporais de ET por tipo de cobertura do solo

Neste item serão analisados alguns resultados da variação espaço-temporal da ET na bacia do rio Vacacaí. Na Figura 5 é apresentada a série temporal da média mensal da ET diária em dias de céu claro por tipo de cobertura do solo. Foram definidos dois grupos de cobertura do solo, o primeiro correspondente à agricultura irrigada (arroz) e de sequeiro (soja), e o segundo agrupando a série total de agricultura em sequeiro, campos naturais, além de áreas de transição, definidas como áreas inicialmente classificadas como campo mas que a partir de 2010 passaram a ser ocupadas por agricultura em sequeiro. Incluiu-se também as médias mensais de precipitação, extraídas do produto TRMM.

Em geral, observa-se que as diferenças entre os tipos de cobertura acentuam-se majoritariamente nos meses de primavera e verão, em virtude da maior quantidade de radiação disponível. Entre os cultivos irrigados e de sequeiro, a ET em áreas irrigadas apresenta uma taxa em torno de 1 a 1,5 mm/dia superior nos meses de irrigação. Em relação ao segundo grupo, analisando-se o padrão de ET entre a agricultura de sequeiro e as áreas de campos naturais, observa-se que as diferenças são pouco significativas, o mesmo ocorrendo nas áreas definidas como de transição.

A Figura 6 apresenta a média sazonal da ET diária entre os meses de dezembro e fevereiro de cada ano/safra para as diferentes coberturas de solo avaliadas, incluindo também a média mensal de precipitação para o mesmo período. Observa-se uma relação bastante direta com a precipitação, uma vez que nas temporadas onde houve redução significativa da média da ET correspondem aos períodos de maiores estiagens, como no início de 2005, 2011 e 2012. Em contraste, nas temporadas úmidas, a maior quantidade de água disponível na superfície acarreta em um aumento na evapotranspiração, embora esse aumento não seja linear. As áreas de agricultura irrigada parecem menos sensíveis a essas oscilações devido ao fato de possuírem fontes complementares de água além da precipitação, mantendo-se uma média em torno de 5 a 5,5 mm/dia, com exceção dos anos de intensa estiagem, acarretando em déficit hídrico para estas culturas. Entre as áreas de campos naturais e de soja, assim como nas áreas identificadas como de transição entre as duas coberturas, verificou-se uma diferença pouco significativa nos padrões de ET, oscilando-se em função do regime de precipitação na bacia.

Por fim, a Figura 7 apresenta a distribuição espacial da média sazonal da ET diária em dias de céu claro em áreas irrigadas para dois períodos distintos, o primeiro representando uma condição com ET elevada e a segunda com baixa disponibilidade hídrica e baixos índices de ET. No primeiro caso é possível observar uma condição bastante uniforme entre as áreas, com valores em torno de 6 mm/dia. No segundo caso, é possível observar diferenças mais significativas, principalmente na porção de cabeceira da bacia, onde a escassez hídrica ocasionou uma redução significativa da ET diária nestas áreas.



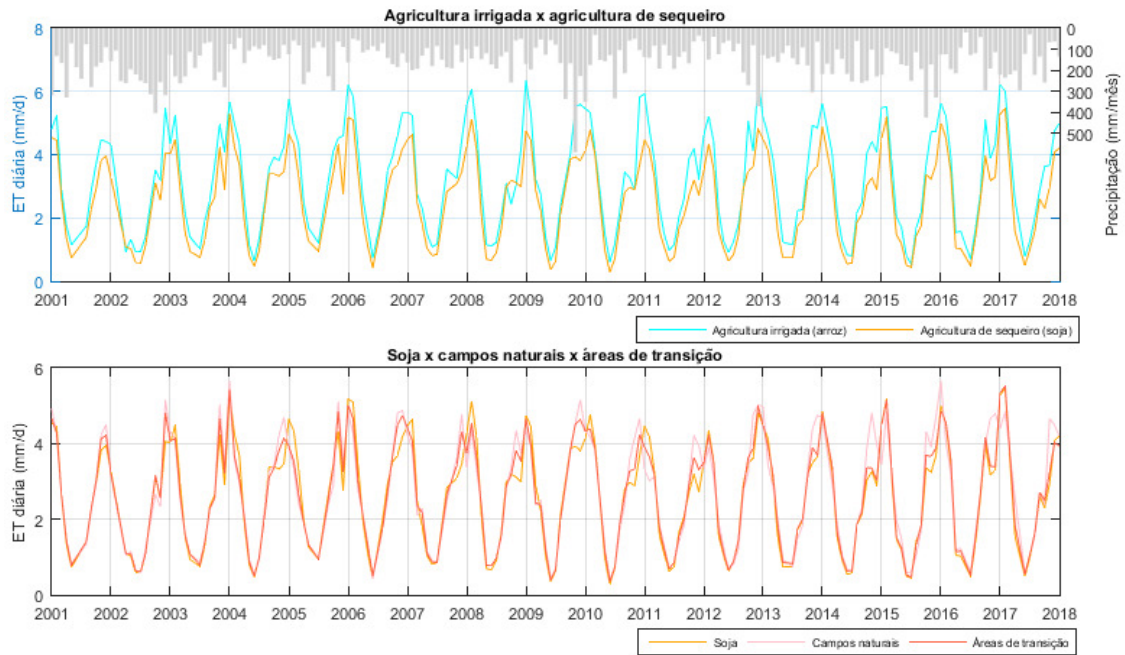


Figura 5 – Séries mensais de evapotranspiração por tipo de cobertura do solo.

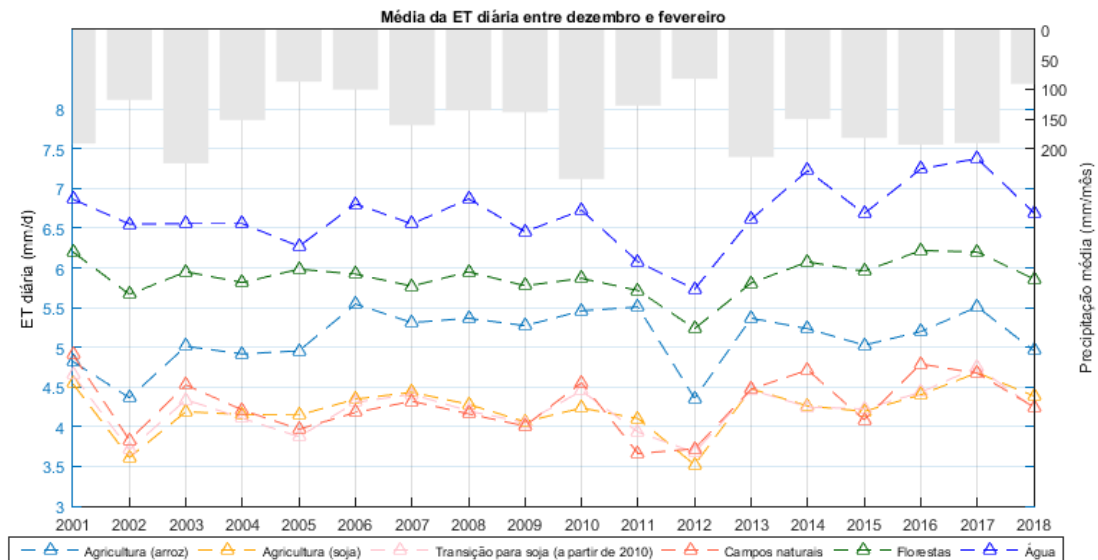


Figura 6 – Média sazonal da ET diária entre os meses de dezembro e fevereiro para os tipos de cobertura do solo avaliados.

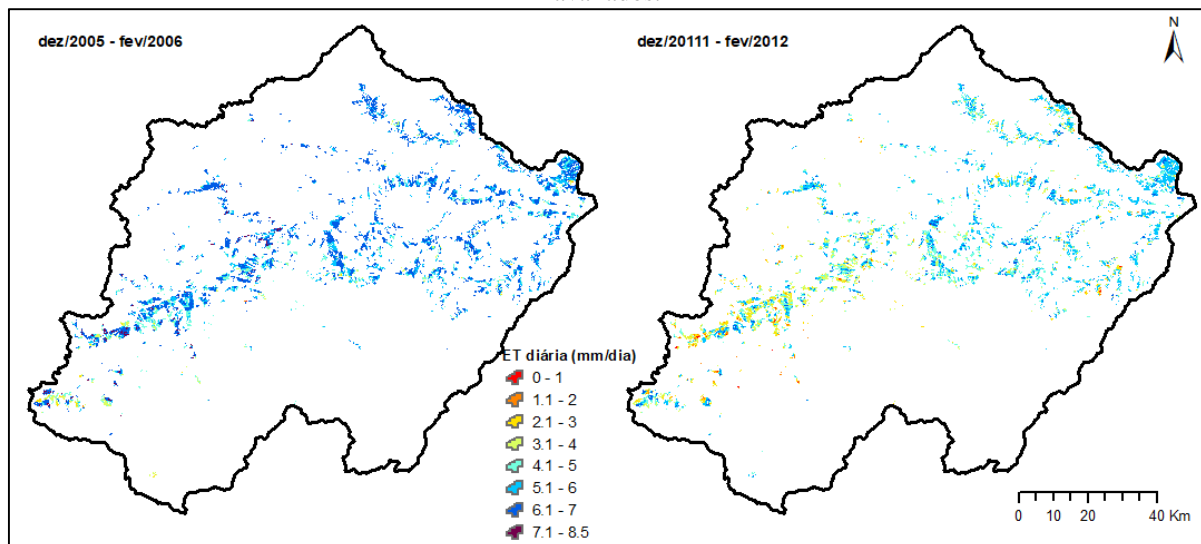


Figura 7 - Distribuição espacial da média sazonal da ET diária em áreas irrigadas para dois períodos distintos.

#### 4. CONCLUSÕES

Através das análises das séries temporais de evapotranspiração na bacia do rio Vacacaí foi possível concluir que as variações sazonais na ET estão diretamente associadas com o regime pluviométrico, principalmente nos períodos de estiagem, onde a redução das taxas de ET podem ser superiores a 20%. Analisando os efeitos de mudança no uso e cobertura da terra, principalmente no que tange ao expressivo aumento da cultura da soja frente à perda de áreas ocupadas por formações campestres, verificou-se que esta alteração não está acarretando em uma mudança expressiva dos padrões de ET, uma vez que ambas as classes apresentam um comportamento bastante similar ao longo de um ciclo. Este trabalho também apresenta o potencial da ferramenta SEBAL na compreensão dos processos de evapotranspiração para fins de controle da agricultura irrigada. Ainda são necessários alguns avanços, como a obtenção de séries mensais de ET a partir dos fluxos diários e a aplicação de metodologias de balanço hídrico para a obtenção de valores dos volumes de irrigação.

#### 5. REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G.; et al. (2007). Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) – Model. *J. Irrig. Drain Eng.* 133, 380–394.
- BASTIAANSEN, W.G.M. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). *Journal of Hydrology.* 213, 198–212.
- BIGGS, T.; et al. (2015). Remote Sensing of Evapotranspiration from Croplands. In: *Handbook of Remote Sensing.* TaylorFrancis.
- DIAS, L.C.P.; et al. (2015). Effects of land cover change on evapotranspiration and streamflow of small catchments in the Upper Xingu River Basin, Central Brazil. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 4, 108–122.
- GORELICK, N., et al. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sens. Environ.* 202, 18–27.
- KAYSER, R. H. B.; RUHOFF, A. L. (2019). Mapeamento da evolução espacial e temporal de áreas agrícolas no bioma pampa utilizando fenologia da vegetação e Google Earth Engine. *Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto.* Santos.
- KICH, E. (2018). Calibração automática do modelo de estimativa de evapotranspiração por sensoriamento remoto (SEBAL). *Dissertação de mestrado.* Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- RUBERT, G.C.D. (2017). Variabilidade sazonal e controle biofísico da evapotranspiração na vegetação do bioma pampa. *Universidade Federal de Santa Maria.*
- SOUZA, V. A. (2018). Evaluation of MOD16 algorithm over irrigated rice paddy using flux tower measurements in Southern Brazil. *Remote Sensing.* 1, 1 -24
- THENKABAIL, P. S.; et al. (2010). A Holistic View of Global Croplands and Their Water Use for Ensuring Global Food Security in the 21st Century through Advanced Remote Sensing and Non-remote Sensing Approaches. *Remote Sens.* 1, 209-261.

**AGRADECIMENTOS** – Os autores agradecem à CAPES/ANA pelo auxílio no contexto do projeto de pesquisa intitulado “Estimativa de evapotranspiração por sensoriamento remoto para gestão de recursos hídricos no Brasil”.