

Spatio-temporal analysis of evapotranspiration and carbon sequestration in the Pajeú-PE river basin using cloud computing

Diogo F. B. Rodrigues^{*}, Suzana M. G. L. Montenegro^{**}, Ana Cláudia V. e L. Gusmão^{***}, Diego C. dos S. Araújo^{****}, Bruno e S. Ursulino^{*****}, José D. A. Oliveira^{*****}

^{*}Professor do Centro Universitário Maurício de Nassau – UNINASSAU/Graças, Recife, Pernambuco, Brasil, e-mail: diogo.borbar@gmail.com,

^{**}Professora Titular do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, Pernambuco, Brasil, e-mail: suzanam.ufpe@gmail.com,

^{***}Pós-doutoranda em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, Pernambuco, Brasil, e-mail: villareluna@yahoo.com.br,

^{****}Pós-doutorando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, Pernambuco, Brasil, e-mail: diego@agro.eng.br,

^{*****}Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia - IFCE, *Campus Aracati*, Ceará, Brasil, e-mail: brunosenga@gmail.com,

^{*****}Doutorando em Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, Recife, Pernambuco, Brasil, e-mail: josediorgenes@gmail.com,

Received 1 July 2021, accepted 20 October 2021

Abstract

Among the different components of the hydrological cycle that presents the greatest difficulty in monitoring is evapotranspiration (ET). In recent years, several remote sensing (SR) methods have been developed for estimating ET at different spatial scales, ranging from farms to large watersheds. In this sense, the objective of the present work was to implement the SEBAL algorithm in a cloud computing platform and to evaluate the dynamics of carbon evapotranspiration and assimilation in the Pajeú river basin. We selected six satellite images that correspond to the days: 09/20/2016, 10/06/2016, 11/07/2016, 11/23/2016, 11/26/2017, 12/12/2017, and the selected area covers part of the municipality of Serra Talhada. The images were processed using the Google Earth Engine (GEE) tool, with the main purpose of actual evapotranspiration and carbon sequestration estimated by SEBAL. The GEE was able to adequately estimate the processes involved in energy balance, evapotranspiration and carbon assimilation over the Pajeú River basin, indicating its potential for the entire Northeast, considering that the platform data series is global. Applications with a more practical focus, considering environmental monitoring, agriculture support and water resources management can be performed with GHG, automating this process and eliminating the use of super powerful computers.

Keywords: MODIS; Google Earth Engine; SEBAL

Análise espaço-temporal da evapotranspiração e do sequestro de carbono na bacia do rio Pajeú-PE utilizando a computação em nuvem

Resumo

Dentre as diferentes componentes do ciclo hidrológico, a que apresenta maior dificuldade de monitoramento é a evapotranspiração (ET). Nos últimos anos diversos métodos de sensoriamento remoto (SR) foram desenvolvidos para a estimativa da ET em diferentes escalas espaciais, abrangendo desde propriedades agrícolas até grandes bacias hidrográficas. Nesse sentido, objetivou-se com o presente trabalho implementar o algoritmo SEBAL em uma plataforma de computação em nuvem e avaliar a dinâmica da evapotranspiração e assimilação de carbono na bacia hidrográfica do rio Pajeú. Foram selecionadas seis imagens de satélites que correspondem aos dias: 20/09/2016, 06/10/2016, 07/11/2016, 23/11/2016, 26/11/2017 e 12/12/2017, e a área selecionada abrange parte do município de Serra Talhada. As imagens foram processadas utilizando a ferramenta Google Earth Engine (GEE), tendo como finalidade principal a evapotranspiração real e o sequestro de carbono estimados pelo SEBAL. O GEE conseguiu estimar de forma adequada os processos envolvidos no balanço de energia, evapotranspiração e assimilação de carbono sobre a bacia hidrográfica do rio Pajeú, indicando o seu potencial para todo o Nordeste, considerando que a série de dados da plataforma é global. Aplicações com foco mais prático, considerando monitoramento ambiental, suporte à agricultura e gerenciamento dos recursos hídricos podem ser realizadas com o GEE, automatizando esse processo e dispensando o uso de computadores superpotentes.

Palavras-chave: MODIS; Google Earth Engine; SEBAL

1. Introdução

Dentre as diferentes componentes do ciclo hidrológico, a que apresenta maior dificuldade de monitoramento é a evapotranspiração (ET). Essa variável hidrológica consiste na associação da perda de água do solo por evaporação juntamente com a água transpirada pelas plantas, sendo fundamental para conhecer o balanço hídrico de uma região. Informações quantitativas das taxas de evapotranspiração são utilizadas na resolução de inúmeros problemas que envolvem o manejo da água, visando a sua sustentabilidade.

Nos últimos anos, diversos métodos de sensoriamento remoto (SR) foram desenvolvidos para a estimativa da ET em diferentes escalas espaciais, abrangendo desde propriedades agrícolas até grandes bacias hidrográficas (McShane et al., 2017). O *Algoritmo Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL), proposto por Bastiaanssen (1998), tem se mostrado muito promissor em estimar a ET em escala regional, pois o modelo usa uma pequena quantidade de dados meteorológicos terrestres e não requer um mapa de classificação de culturas (Bashir et al., 2008).

Por meio do algoritmo SEBAL é possível estimar a evapotranspiração diária, através de imagens de satélite, que permite a visualização da variação espacial desse elemento, assim como a estimativa do sequestro de carbono. O sequestro de carbono é um processo de remoção de gás carbônico da atmosfera. Tal processo ocorre principalmente em oceanos, florestas e em organismos que, através da fotossíntese, capturam o carbono e lançam oxigênio na atmosfera.

Os dados de sensoriamento remoto demandam de elevada capacidade de armazenamento e processamento, impactando a aplicação de modelos como o SEBAL. Nesse sentido, a plataforma *Google Earth Engine* (GEE) possibilita o processamento em larga escala de informações geoespaciais, a partir da computação de alto desempenho em nuvem e do

acesso a um vasto acervo de dados orbitais (Gorelick et al., 2017). Essa plataforma, ainda, tem a capacidade de lidar com uma variedade de questões sociais de alto impacto, incluindo desmatamento, seca, desastres, doenças, segurança alimentar, gerenciamento de água, monitoramento climático e proteção ambiental.

A disponibilidade de grande quantidade de imagem de satélite na plataforma diminui a restrição no compartilhamento de dados entre usuários, reprodutibilidade desses resultados científicos e direcionando ao problema específicos da pesquisa. Nos últimos anos, o GEE tem procurado fornecer esses serviços para as comunidades científicas e não científicas em geral (Sidhu et al., 2018).

Nesse sentido, objetivou-se com o presente trabalho implementar o algoritmo SEBAL em uma plataforma de computação em nuvem e avaliar a dinâmica da evapotranspiração e assimilação de carbono na bacia hidrográfica do rio Pajeú.

2. Material e métodos

Área de Estudo

A bacia hidrográfica do rio Pajeú possui uma área de 16.838,70 km² e está, em sua totalidade, no Estado de Pernambuco, entre as coordenadas geográficas de 07° 16' 20" e 08° 56' 01" de latitude sul e 36° 59' 00" e 38° 57' 45" de longitude a oeste de Greenwich. Os municípios totalmente inseridos nesta bacia hidrográfica são Afogados da Ingazeira, Betânia, Brejinho, Calumbi, Flores, Ingazeira, Itapetim, Quixabá, Santa Cruz da Baixa Verde, Santa Terezinha, São José do Egito, Serra Talhada, Solidão, Tabira, Triunfo e Tuparetama.

Visando minimizar o erro da estimativa da evapotranspiração pelo algoritmo SEBAL, optou-se por trabalhar em uma área menor, definida por um recorte da tile *path216_row65*, que abrange parte do município de Serra Talhada e onde está inserida uma estação automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

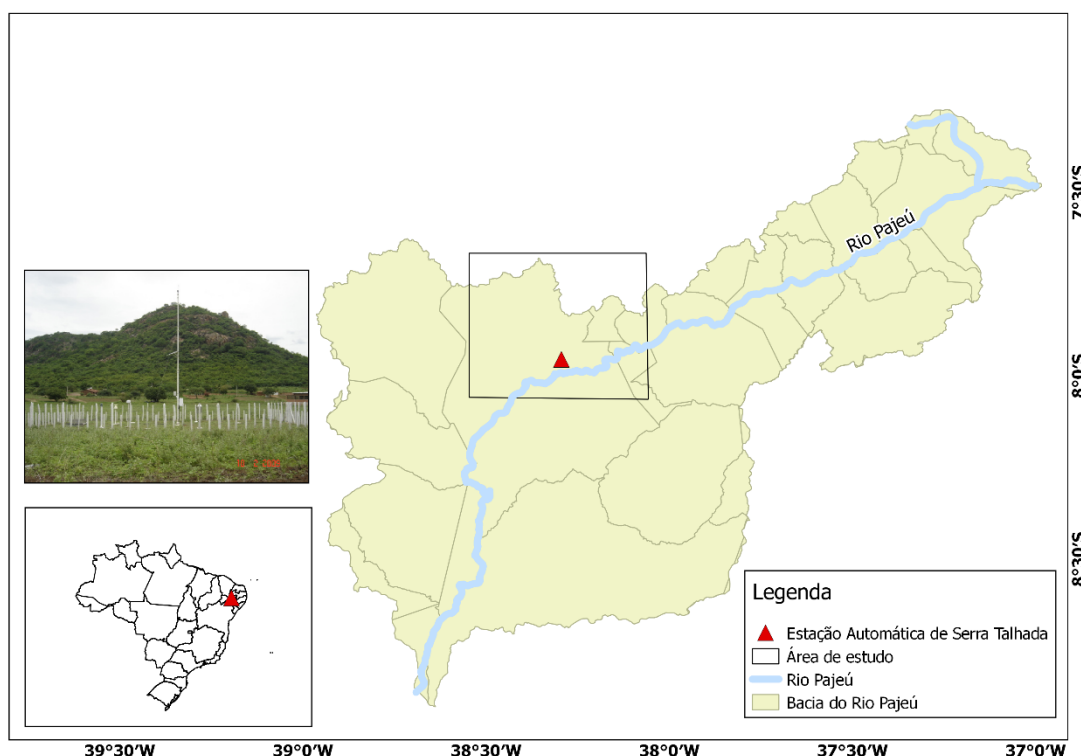


Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do rio Pajeú, no Estado de Pernambuco, com indicação da estação automática no INMET utilizada no estudo.

Dados

O banco de dados é composto pelos registros da estação meteorológica automática de Serra Talhada (Plataforma de Coleta de Dados – PCD), disponibilizado pelo INMET, inserida dentro do perímetro da bacia hidrográfica do rio Pajeú.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra a média da temperatura do

ar mensal para os anos de 2016 e 2017, que corresponde ao período das cenas estudadas nesta pesquisa. Os menores valores da temperatura do ar são observados no mês de julho, com um valor médio de 23,38 °C para os dois anos analisados, já os maiores ocorreram no mês de novembro, com média de 28,91 °C.

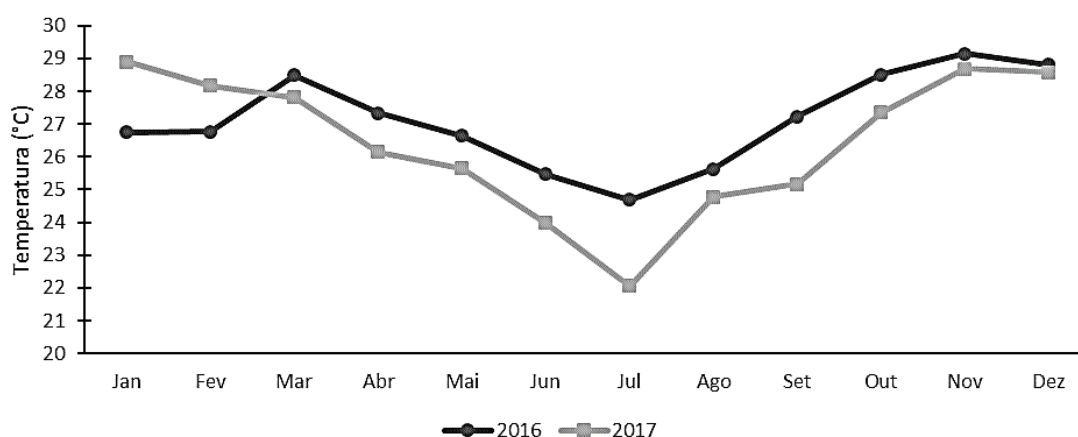


Figura 2 - Temperatura de ar para os anos de 2016 e 2017, na estação de Serra Talhada, Pernambuco. Fonte: INMET (<https://bdmep.inmet.gov.br/>).

A precipitação total do ano de 2016 foi de 503,8 mm, e em 2017 de 630,2 mm (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Analisando a precipitação ocorrida três meses antes da passagem do satélite, em cada cena foram observados os

seguintes resultados: 45,0 mm para cena de 20/09/2016; 29,4 mm para 06/10/2016; 22,4 mm para 07/11/2016 e para 23/11/2016; 5,0 mm para 26/11/2017; 5,4 mm para 12/12/2017.

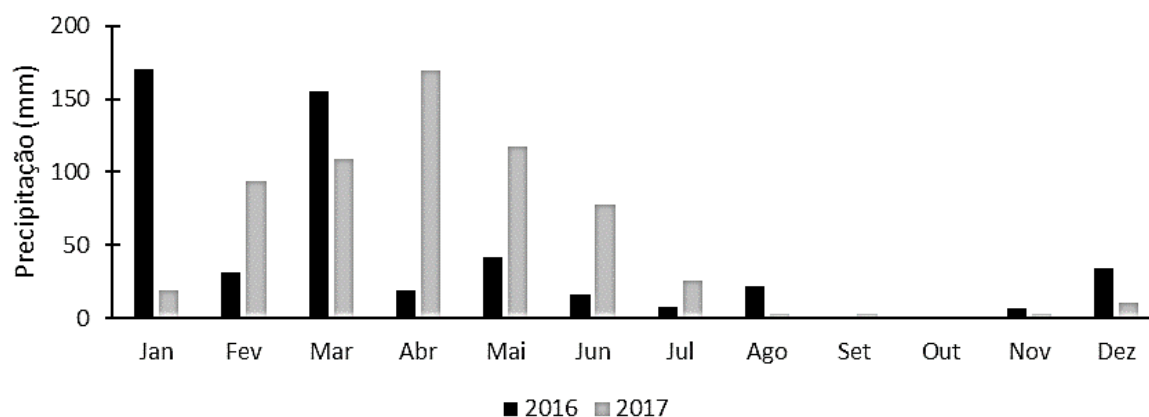


Figura 3 - Gráfico da precipitação pluviométrica na estação de Serra Talhada, Pernambuco, para os anos de 2016 e 2017. Fonte: INMET (<https://bdmep.inmet.gov.br/>).

Processamento

As imagens foram processadas utilizando a ferramenta *Google Earth Engine* (GEE), que permite realizar o processamento das imagens diretamente do browser de internet, utilizando a computação em nuvem de alto desempenho. A ferramenta é composta por um vasto catálogo de imagens LandSat, MODIS e Sentinel, onde é possível processar as imagens sem a necessidade de realizar o download das mesmas. Foram selecionadas seis imagens com menor incidência de nuvens, durante os anos de 2016 a 2017, do sensor OLI LandSat8.

O algoritmo SEBAL foi implementado no GEE por meio de linguagem de programação *JavaScript*. O script foi elaborado de forma a facilitar

a aplicação do SEBAL para outras datas e em outras áreas. As saídas do script desenvolvido são as cartas do fluxo de calor no solo (G), fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor latente (LE), saldo de radiação e a evapotranspiração diária, obtidos com o produto OLI Landsat8 disponível no repositório online do GEE.

Os usuários podem acessar e analisar dados do catálogo público, bem como seus próprios dados privados usando uma biblioteca de operadores fornecida pela API do GEE. Esses operadores são implementados em um grande sistema de processamento paralelo que subdivide e distribui automaticamente as computações, fornecendo recursos de análise de alto rendimento (Figura 4).

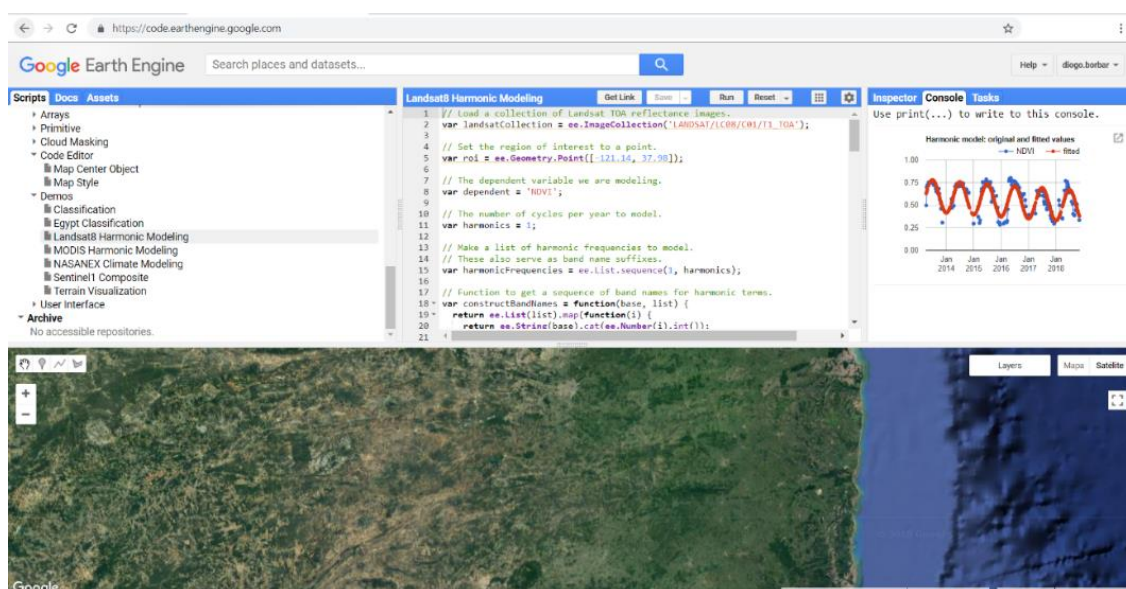


Figura 4 – Interface do ambiente de desenvolvimento interativo do *Google Earth Engine* (GEE), utilizado para os processamentos realizados dentro da plataforma e exportação de dados.

Os usuários podem se inscrever para acessar a página inicial do GEE (<https://earthengine.google.com>) e acessar a interface do usuário, bem como um guia do usuário, tutoriais,

exemplos, vídeos de treinamento, referência de função e currículos educacionais. Embora a experiência anterior com GIS, sensoriamento remoto e scripts tornem mais fácil começar, eles não são

estritamente necessários, e o guia do usuário é orientado para os novatos de domínio. As contas vêm com uma cota para fazer o upload de dados pessoais e salvar produtos intermediários, e qualquer entrada ou resultado pode ser baixado para uso off-line (Gorelick et al., 2017).

SEBAL

O *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL), foi aplicado para estimar a ET na área de estudo. O SEBAL utiliza dados multiespectrais de Sensoriamento Remoto associados a dados meteorológicos complementares para estimar componentes instantâneos e diários do balanço de energia superficial (Oliveira et al., 2014). O requisito de informações multiespectrais e termais significa que o algoritmo só pode ser usado com imagens adquiridas em dias sem nuvens (Ruhoff, 2011). No SEBAL, a ET é calculada para cada pixel da imagem com a equação do balanço de energia, considerando o fluxo de calor latente ($LE: W m^{-2}$), sem discriminação entre o solo e os componentes do dossel, como um resíduo da equação do balanço energético (Equação 1). Informações mais detalhadas sobre o cálculo dos componentes do balanço energético pelo algoritmo são fornecidas por Bastiaansen et al. (1998).

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

A evapotranspiração real diária (ET, $mm d^{-1}$) estimada pelo SEBAL é obtida através da seguinte equação (Bastiaansen, 2000):

$$ET = 0,035 \left(\frac{LE}{R_n - G} \right) [(1 - \alpha) R_s - 110 \tau_{24h}] \quad (2)$$

em que: R_n - saldo instantâneo de radiação ($W m^{-2}$); G - fluxo de calor no solo ($W m^{-2}$); α - albedo da superfície; R_s - radiação solar global diária ($W m^{-2}$); τ_{24h} - transmissividade atmosférica média diária.

A suposição principal do algoritmo é considerar a linearidade entre a diferença da temperatura do ar (dT) e a temperatura da superfície ($dT = a + b T_{sup}$) cujas constantes de calibração “a” e “b” são obtidas em pixels com condições extremas de temperatura e disponibilidade hídrica: um pixel frio (localizado no reservatório do rio Tapacurá) com $H = 0$ e um pixel quente (área com pouca ou nenhuma presença de vegetação e baixo conteúdo de umidade) em que $LE = 0$, ou seja, $H = R_n - G$, o que tornou possível obter os valores das constantes de calibração (Bastiaansen et al., 1998; Papadavid et al., 2013; Oliveira et al., 2014).

Sequestro de Carbono

A produtividade primária bruta (GPP), ou produção de biomassa vegetal, é a quantidade de carbono assimilado no processo de fotossíntese. Sua quantificação por sensoriamento remoto parte da combinação do modelo de estimativa da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFAA) pela vegetação, proposto por Monteith (1972), com o modelo de eficiência de uso da luz na fotossíntese de Field et al. (1995), adaptado por Bastiaansen e Ali (2003), que sugerem o emprego da fração evaporativa (FE) como elemento quantificador do status da água pela vegetação. A obtenção da fração evaporativa decorre da aplicação sequencial em imagens de satélites do algoritmo SEBAL.

O quantitativo da produtividade primária bruta ($gC m^{-2}$) é definido pelo modelo de Monteith (1972):

$$GPP = RFAA \times \varepsilon = RFA \times FPAR \times \varepsilon \quad (3)$$

onde RFAA é a radiação fotossinteticamente ativa absorvida ($W m^{-2}$) pela vegetação; ε eficiência do uso de luz da vegetação ($gC MJ^{-1}$); RFA radiação fotossinteticamente ativa ($W m^{-2}$) e FPAR fração da radiação RFA que é absorvida pela vegetação.

A radiação fotossinteticamente ativa ($W m^{-2}$) compreende a região espectral de 400 a 700 nm e pode ser estimada como uma fração da radiação solar global diária. Na ausência de medições *in loco* da RFA, pode-se estimá-la em função da radiação solar global, ou seja, $RFA = 0,48 R_s 24h$ (Bastiaansen e Ali, 2003), onde $R_s 24h$ é a radiação solar global diária ($W m^{-2}$).

A radiação fotossinteticamente ativa absorvida ($W m^{-2}$) é expressa em função do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada - IVDN, proposta por Daughtry et al. (1995) e que tem sido usada em outros estudos (Bastiaansen e Ali, 2003; Silva et al., 2012), em que:

$$RFAA = RFA \times (-0,161 + 1,257 \times IVDN) \quad (4)$$

A eficiência do uso de luz - ε ($gC MJ^{-1}$), embora dependa de outros elementos da comunidade vegetal, pode ser quantificada pelo modelo de Field et al. (1995), modificado por Bastiaansen e Ali (2003) e recentemente empregada por Silva et al. (2012):

$$\varepsilon = \varepsilon' \times T_1 \times T_2 \times FE \quad (5)$$

em que ε' é a eficiência máxima de uso da luz pela vegetação; FE fração evaporativa, que reflete a contribuição do fator água na fotossíntese; T_1 e T_2 refletem a contribuição da temperatura na eficiência de uso da luz pelas plantas.

A fração evaporativa apresenta regularidade e constância em dias de céu claro e tem relevante influência, pois representa a contribuição do elemento água na fotossíntese e pode ser determinada com base no balanço de energia segundo o SEBAL, conforme (Bastiaanssen et al., 1998; Silva et al., 2010; Silva et al., 2012):

$$FE = \frac{LE}{(Rn - G)} \quad (6)$$

3. Resultados e discussão

O Google Earth Engine (GEE) já é amplamente para estudos ambientais. Devido ao alto potencial e grande agregação de dados, a plataforma é considerada uma rica base de dados web baseada em nuvem, com a capacidade de realizar avaliações espaciais e temporais utilizando uma coleção de imagens orbitais obtidas por sensoriamento remoto (Sidhu et al., 2018).

Os dados gerados pelo GEE foram bastante consistentes sobre a área de estudo na bacia hidrográfica do rio Pajeú. Apesar de preliminares, esses resultados confirmam o potencial da ferramenta para o monitoramento contínuo de variáveis biofísicas, com grande aplicabilidade em diversas áreas de estudo, especialmente com foco ambiental e agrícola. Apesar de estudos com o SEBAL não serem relativamente novos, somente nos últimos anos surgiu a necessidade de automação desse processo utilizando computação em nuvem, o que dispensa o download de centenas de imagens e inviabiliza as aplicações em longa escala temporal.

Em um estudo realizado no Peru, Milagros et al. (2018) utilizaram o GEE para monitorar temporalmente mudanças no uso e ocupação do solo, confirmando a eficiência da ferramenta para esse tipo de aplicação. No Pará, Azevedo e Barbosa (2020) analisaram, por meio do GEE, variações do IVDN e

da temperatura de superfície do solo em Área de Proteção Ambiental (APA), entre os anos de 2000 a 2019. Dhungel e Barber (2018), em uma aplicação mais avançada, não utilizaram o GEE como objeto principal de estudo, e sim como uma das ferramentas metodológicas, aplicando à plataforma o modelo *Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration* (METRIC) para estimativa da evapotranspiração em uma área agrícola da Califórnia.

No Brasil, as aplicações com o GEE ainda estão em fases iniciais, principalmente concentradas na avaliação da aplicabilidade e facilidade de uso da plataforma. Obviamente, o intuito é utilizá-la como ferramenta metodológica para aplicações futuras, dispensando a necessidade de verificar a eficiência dos dados obtidos (Caña et al., 2015).

Alguns padrões espaciais temporais podem ser inferidos sobre os dados gerados pelo GEE. O saldo de radiação (Rn) tem relação inversa com o albedo da superfície; menores valores de Rn correspondem a solo exposto com pouca vegetação, quanto que maiores valores indicam áreas com vegetação e corpos hídricos. Oliveira et al. (2015), em estudo realizado na Zona da Mata de Pernambuco, constataram que o Rn recebe forte influência do albedo e da temperatura de superfície do solo. Os autores registraram menor magnitude do saldo de radiação em áreas urbanas ou de solo exposto, e maior magnitude em áreas vegetadas e de corpos hídricos.

Padrão similar foi detectado na bacia hidrográfica do rio Pajeú, sendo o mês de outubro de 2016 o que apresentou maiores valores de Rn em toda a área (Tabela 1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Tanto em 2016 quanto em 2017 não foram detectadas chuvas sobre a bacia nesse período, no entanto, 2016 já vinha sendo acometido por uma seca mais severa, o que pode ter favorecido esse padrão.

Tabela 1. Valores do máximo, médio, mínimo e desvio padrão do saldo de radiação instantâneo ($W m^{-2}$) para bacia hidrográfica do rio Pajeú, Pernambuco.

Data	Máx.	Méd.	Min.	DP
20/09/2016	754.35	595.27	340.12	53.30
06/10/2016	759.07	622.91	403.64	47.16
07/11/2016	764.04	612.72	268.70	50.71
23/11/2016	723.86	558.90	11.75	55.83
26/11/2017	745.95	584.41	215.56	52.36
12/12/2017	770.77	602.62	-141.28	54.24

DP = desvio padrão.

A evapotranspiração diária ($mm dia^{-1}$) apresentou padrão espacial e temporal análogo ao do fluxo de calor latente, que é a energia utilizada na mudança da água da forma líquida para a gasosa,

sendo considerada a energia subtraída da superfície do solo, por isso tem forte relação com o processo evapotranspirativo (Cunha et al. 2002). O mês de novembro de 2017 foi o que apresentou menores

valores de ET (Figura 1). Como o período anterior não foi avaliado para o mesmo ano, esses menores valores podem estar relacionados à escassez de chuvas, ainda maior que no ano de 2016. Isso pode ter contribuído com os valores mais limitantes de ET, considerando que a área estava com a seca

acumulada desde o mês de agosto, onde não foram registradas chuvas. O padrão espacial é coerente com a resposta espectral dos alvos e suas características. Áreas com maiores taxas de ET correspondem a vegetação mais adensada, de florestas ou colinas.

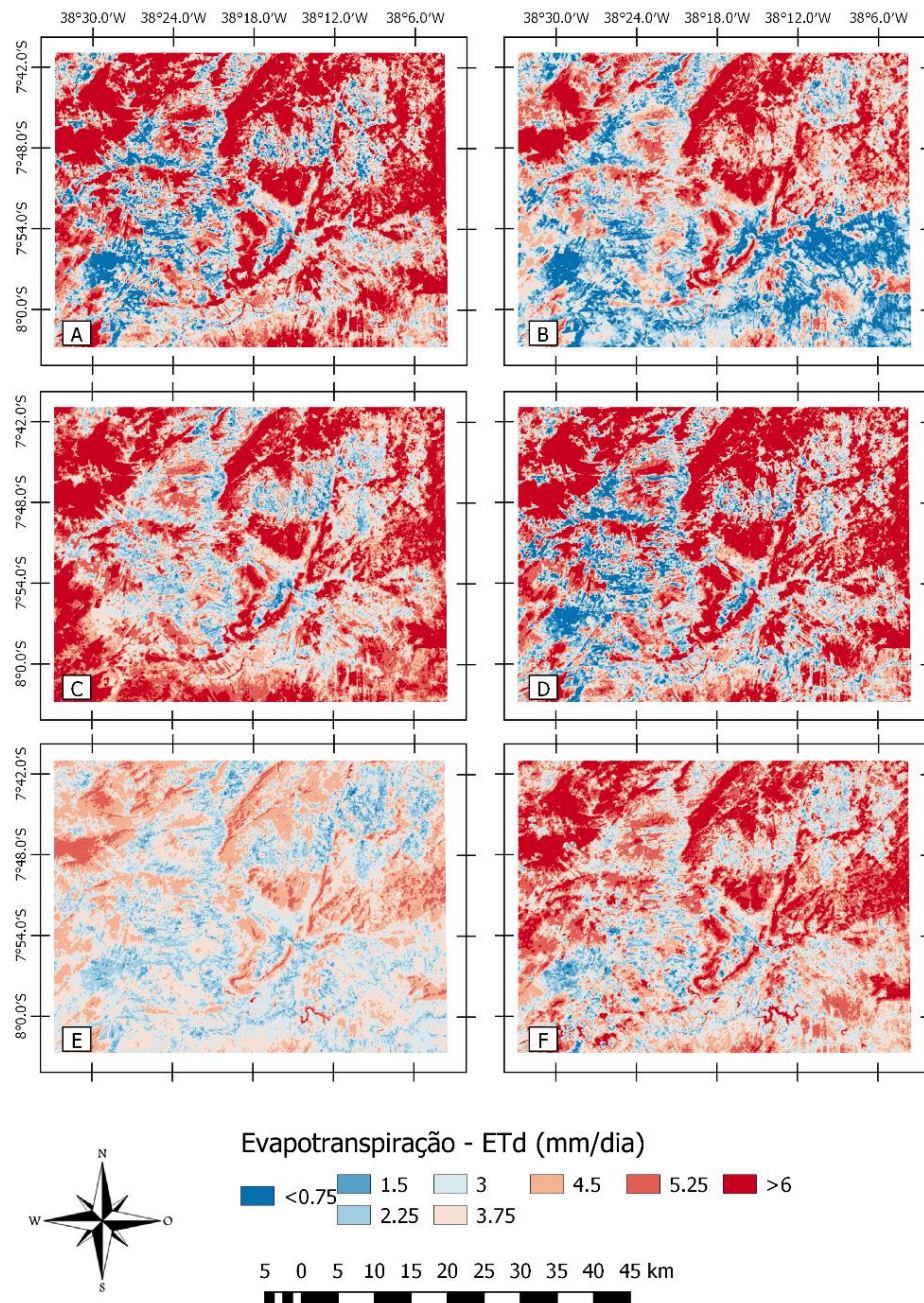


Figura 1. Cartas temáticas da evapotranspiração diária para bacia hidrográfica do rio Pajeú, Pernambuco, para as cenas: (A) 20/09/2016, (B) 06/10/2016, (C) 07/11/2016, (D) 23/11/2016, (E) 26/11/2017, (F) 12/12/2017.

Além da ET, a Produtividade Primária Bruta (GPP) também foi estimada espacialmente por meio do GEE. A GPP permite inferir sobre a qualidade do carbono fixada por uma determinada área de floresta, sendo um índice de grande relevância quando se considera o atual panorama de redução da emissão de carbono na atmosfera em virtude de sua influência sobre os padrões climáticos (Souza et al., 2014).

O padrão espacial da distribuição do GPP é similar à da ET, com áreas mais vegetadas apresentando valores maiores quando comparadas às áreas urbanas, de pastagem ou solo exposto (Figura 2), indicando a forte relação entre a ET e a GPP.

Os valores médios da GPP, bem como os dados complementares empregados no seu computo, encontram-se na Tabela 2. O menor valor médio de

GPP foi percebido no dia 23/11/2016 ($2,92 \text{ gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e o maior em 07/11/2016 ($2,92 \text{ gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). A redução nos valores médios de GPP a partir do final de novembro pode estar associada a alterações na dinâmica da vegetação, além da própria radiação

solar, que sofreu redução de valores a partir desse período (Machado, 2014), se mantendo mais baixa em 2017 em toda a área, conforme expresso na Tabela 1.

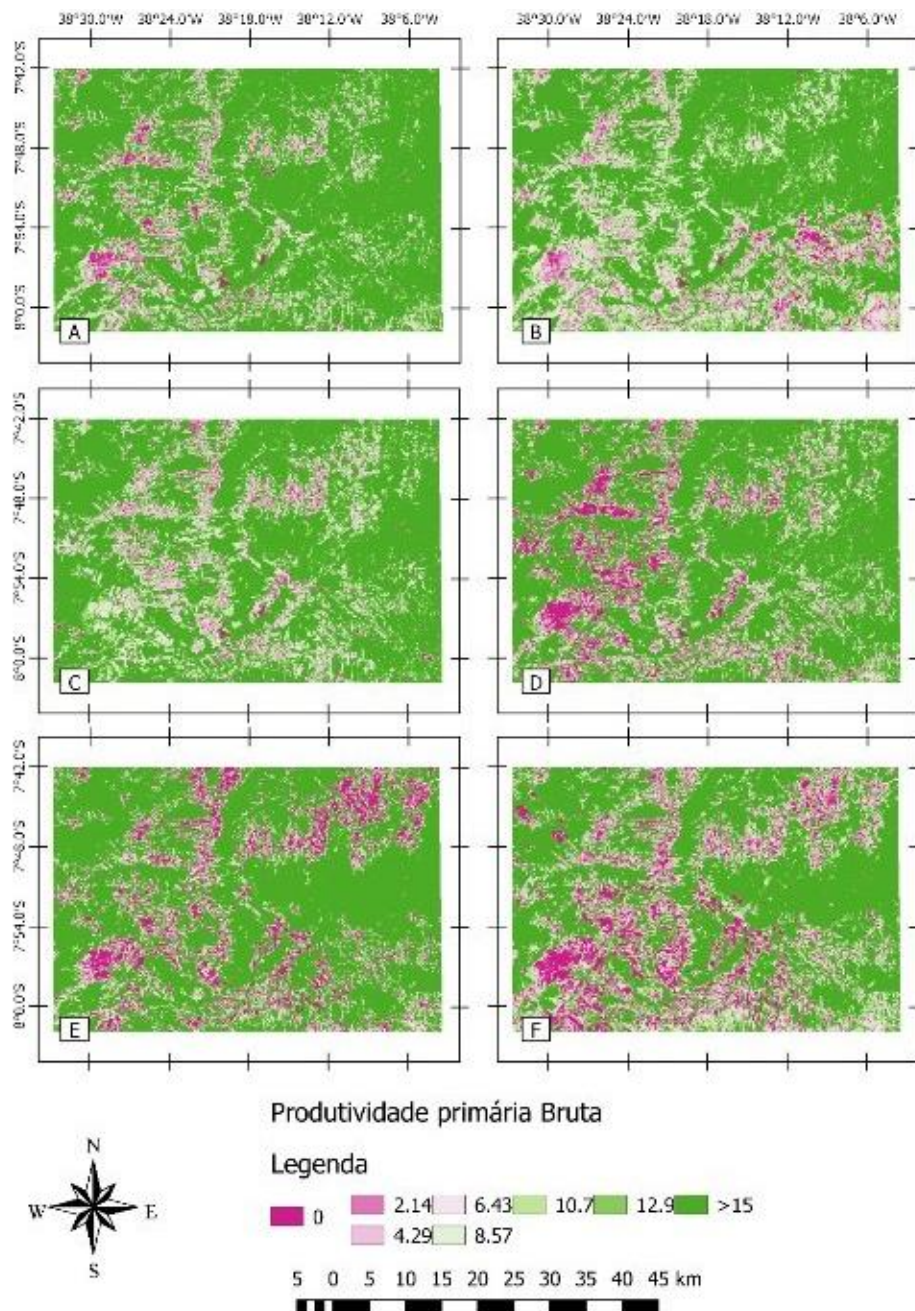


Figura 2. Cartas temáticas da Produtividade Primária Bruta (GPP) na bacia hidrográfica do rio Pajeú, Pernambuco, para as cenas: (A) 20/09/2016, (B) 06/10/2016, (C) 07/11/2016, (D) 23/11/2016, (E) 26/11/2017, (F) 12/12/2017.

Tabela 2. Datas das imagens, temperatura média do ar do mês de máximo NDVI - T_{opt} ($^{\circ}\text{C}$), temperatura média do dia - T_{dia} ($^{\circ}\text{C}$), Radiação Solar Global - R_s (W m^{-2}), valores de T_1 e T_2 referente aos dias selecionados para a pesquisa na bacia hidrográfica do rio Pajeú, Pernambuco.

Data	R_s (W m^{-2})	T_{opt} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{dia} ($^{\circ}\text{C}$)	T_1	T_2	GPP ($\text{gC m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)
20/09/2016	233.836	27.333	28.021	0.973	0.999	17.1
06/10/2016	223.832	27.333	29.808	0.973	0.999	9.994
07/11/2016	250.327	27.333	30.507	0.973	0.999	18.43
23/11/2016	262.067	27.333	31.931	0.973	0.999	2.92
26/11/2017	251.440	25.642	27.579	0.984	0.999	9.12

4. Conclusões

O GEE conseguiu estimar de forma adequada os processos envolvidos no balanço de energia, evapotranspiração e assimilação de carbono sobre a bacia hidrográfica do rio Pajeú, indicando o seu potencial para todo o Nordeste, considerando que a série de dados da plataforma é global.

Aplicações com foco mais prático, considerando monitoramento ambiental, suporte à agricultura e gerenciamento dos recursos hídricos podem ser realizadas com o GEE, automatizando esse processo e dispensando o uso de computadores superpotentes.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FACEPE, CAPES e CNPq pelas bolsas de doutorado, pós-doutorado e pesquisador DTI-B. Universal do CNPq (Proc. 448236/2014-1), pela bolsa PQ-CNPq (Produtividade e Pesquisa – Proc. 313392/2020-0) da segunda autora. Aos projetos SUPER-CNPq (Proc. 446254/2015), Universal MCTIC/CNPq 28/2018 (Proc. 431980/2018-7), PEGASUS MCTI/CNPq Nº 19/2017 (Proc. 441305/2017-2), CNPq/MCTIC/BRICS 29/2017 (Proc. 442335/2017.2) e ao INCT Mudanças Climáticas – Fase II. A FACEPE pelo consórcio UNIVERSITAS (APQ-0300-5.03/17) e os projetos APQ-0885-3.01/16 e BCT-0240-3.01/17. A CAPES pelo auxílio pesquisa n. 88881.159246/2017-01.

Referências

- Azevedo, S.A., Barbosa, L.C., 2020. Estudo do índice de vegetação e temperatura da superfície terrestre na Área de Proteção Ambiental Triunfo do Xingu (PA) utilizando o Google Earth Engine. *Northeast Geosciences Journal* 6, 244-256.
- Bashir, M.A., Hata, T., Tanakamaru, H., Abdelhadi, A. W., Tada, A., 2008. Satellite-based energy balance model to estimate seasonal evapotranspiration for irrigated sorghum: a case study from the Gezira scheme, Sudan. *Hydrology and Earth System Sciences* 12, 1129–1139. doi: <https://doi.org/10.5194/hess-12-1129-2008>.
- Bastiaanssen, W.G.M., 2000. SEBAL - based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology* 229, 87-100.
- Bastiaanssen, W.G.M., Ali, S., 2003. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 94, 321-340.
- Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A., Holtslag, A.A.M., 1998. The surface energy balance algorithm for land (SEBAL). Part 1, formulation. *Journal of Hydrology* 212-213, 98-298.
- Caña, B.B., Rosa, K.K., Costella, R.Z., 2015. Análise de transformação da Floresta Amazônica a partir do uso de geotecnologias - Google Earth Engine - nas aulas de Geografia do Ensino Fundamental. *Boletim gaúcho de geografia* 42, 553–567.
- Cunha, AR., Escobedo, J.F., Klosowski, E.S., 2002. Estimativa do fluxo de calor latente pelo balanço de energia. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 37, 735–743.
- Daughtry C.S.T., McMurtrey III, J.E., Chappelle, E. W., Dulaney, W.P., Irons, J.R., Satterwhite, M.B., 1995. Potential for discriminating crop residues from soil by reflectance and fluorescence. *Agronomy Journal* 87, 165-171.
- Dhungel, S., Barber, M.E., 2018. Estimating calibration variability in evapotranspiration derived from a satellite-based energy balance model. *Remote Sensing* 10, 1–25.
- Field, C.B., Randerson, J.T., Malmstrom, C.M., 1995. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment* 51, 74-88.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R., 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment* 202, 18-27.
- Machado, C.C.C., 2014. Alterações na superfície do parque nacional do Catimbau (PE-Brasil): consolidação dos aspectos biofísicos na definição dos indicadores ambientais do bioma Caatinga. Tese (Doutorado). Recife, UFPE.
- McShane, R.R., Driscoll, K.P., Sando, R., 2017. A review of surface energy balance models for estimating actual evapotranspiration with remote sensing at high spatiotemporal resolution over large extents: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2017–5087, 1-19. doi: <https://doi.org/10.3133/sir20175087>.
- Milagros, L., Villavicencio, M., Mendes, D., Melo, L., Andrade, B., Monteiro, F.F., 2018. Mapeamento das Mudanças na Cordilheira Vilcanota-Peru Google Earth Engine: Mapping Changes in the Vilcanota-Peru Mountain Range. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ* 41, 427–433.

- Monteith, J.L., 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology* 9, 747-766.
- Oliveira, L.M.M., Montenegro, S.M.G.L., Silva, B.B., Antonino, A.C.D., Moura, A.E.S.S., 2014. Evapotranspiração real em bacia hidrográfica do Nordeste brasileiro por meio do SEBAL e produtos MODIS. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 18, 1039-1046. doi: <https://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18n10p1039-1046>.
- Oliveira, L.M.M., Montenegro, S.M.G.L., Silva, B.B.; Moura, A.E.S.S., 2015. Balanço de radiação por sensoriamento remoto em bacia hidrográfica da zona da mata nordestina. *Revista Brasileira de Meteorologia* 3, 16-28.
- Papadavid, G., Hadjimitsis, D.G, Toullos, L., Michaelides, S., 2013. A Modified SEBAL modeling approach for estimating crop evapotranspiration in Semi-arid conditions. *Water Resources Management* 27, 3493-3506.
- Ruhoff, A.L., 2011. Sensoriamento remoto aplicado a estimativa da evapotranspiração. Tese (Doutorado). Porto Alegre, UFRGS.
- Sidhu, N., Pebesma, E., Câmara, G., 2018. Using Google Earth Engine to detect land cover change: Singapore as a use case. *European Journal of Remote Sensing* 51, 486-500.
- Silva, B.B., Braga, A.C., Braga, C.C., Oliveira, L.M.M., Galvêncio, J.D., Montenegro, S.M.G.L., 2012. Evapotranspiração e estimativa da água consumida em perímetro irrigado do Semiárido brasileiro por sensoriamento remoto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 47, 1218-1226.
- Silva, G.B.S., Formaggio, A.R., Shimabukuro, Y.E., Adami, M., Sano, E.E., 2010. Discriminação da cobertura vegetal do Cerrado matogrossense por meio de imagens MODIS. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 45, 186-194.
- Souza, M.C., Biudes, M.S., Danelichen, V.H.M., Machado, N.G., Musis, C.R., Vourlitis, G.L., Nogueira, J.S., 2014. Estimation of gross primary production of the Amazon-Cerrado transitional forest by remote sensing techniques. *Revista Brasileira de Meteorologia* 29, 1-12.