

## **Desenvolvimento de Algoritmos de Automação Baseados no Modelo SEBAL e Dados Landsat 5 para Análise de Características Físicas na Bacia do Rio Mogi-Guaçu**

João Otavio Alves Accioly <sup>1</sup>

Heliofábio Barros Gomes <sup>2</sup>

Luiz Soares Neto <sup>1</sup>

Glauber Lopes Mariano <sup>2</sup>

Fabício Daniel dos Santos Silva <sup>2</sup>

Júlia Alves Ferreira de Araújo <sup>1</sup>

### *Resumo*

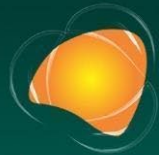
No Brasil, as maiores produções de cana-de-açúcar estão nas regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul, onde o cerrado nativo tem sido substituído por áreas agrícolas. A gestão eficiente dos recursos hídricos é essencial para manter a sustentabilidade dessas culturas. Este estudo concentra-se no interior do Estado de São Paulo, especialmente na bacia do Rio Mogi Guaçu, onde a cobertura original do cerrado foi alterada para agricultura e pastagem. Utilizando dados do satélite Landsat 5 e a plataforma Google Earth Engine (GEE), o objetivo é desenvolver e automatizar um algoritmo baseado no modelo SEBAL para analisar o saldo de radiação e as características físicas das áreas de cerrado e cana-de-açúcar. A metodologia envolve a calibração e análise dos dados de superfície para avaliar as condições da vegetação e fatores físicos do tempo. Os resultados mostram mudanças significativas na cobertura do solo e fornecem indicativos sobre a gestão dos recursos hídricos da região.

**Palavras-chave:** Sensoriamento Remoto, Google Earth Engine, SEBAL, Saldo de Radiação.

---

<sup>1</sup> Alunos do Curso de Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Ciências Atmosféricas, joao.accioly@icat.ufal.br, luiz.neto@icat.ufal.br, julia.araujo@icat.ufal.br .

<sup>2</sup> Profs. Drs. da Universidade Federal de Alagoas – Campus Maceió, Instituto de Ciências Atmosféricas, heliofabio@icat.ufal.br, glauber.mariano@icat.ufal.br, fabricio.santos@icat.ufal.br.



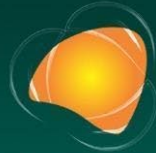
## INTRODUÇÃO

No Brasil, a concentração de área que hospeda as maiores produções de cana de açúcar está entre as regiões centro-oeste, sudeste e sul do país. Regiões que nas últimas décadas vêm passando por transformações em sua cobertura vegetal, em maior ocorrência, a troca da vegetação do cerrado nativo para áreas voltadas a fins agrários. Originalmente, as áreas de Cerrado cobriam 33% do território de São Paulo (IBGE, 2004), ao decorrer dos anos as áreas de ocupação do Cerrado foram alteradas para áreas de agricultura perene, agricultura anual e pastagem plantada em sua maioria (TerraClass, 2013).

A otimização do uso de recursos hídricos é um processo que deve ser observado em um país produtor como o Brasil, com o maior quantitativo de produção de cana de açúcar no mundo (Costa, 2024). Essas produções massivas de culturas resistentes à condições adversas do ambiente não se faz descartar a necessidade de ter o manejo eficiente de irrigação, conseqüentemente, estimativas que determinam componentes importantes na caracterização física de determinados ambientes são essenciais.

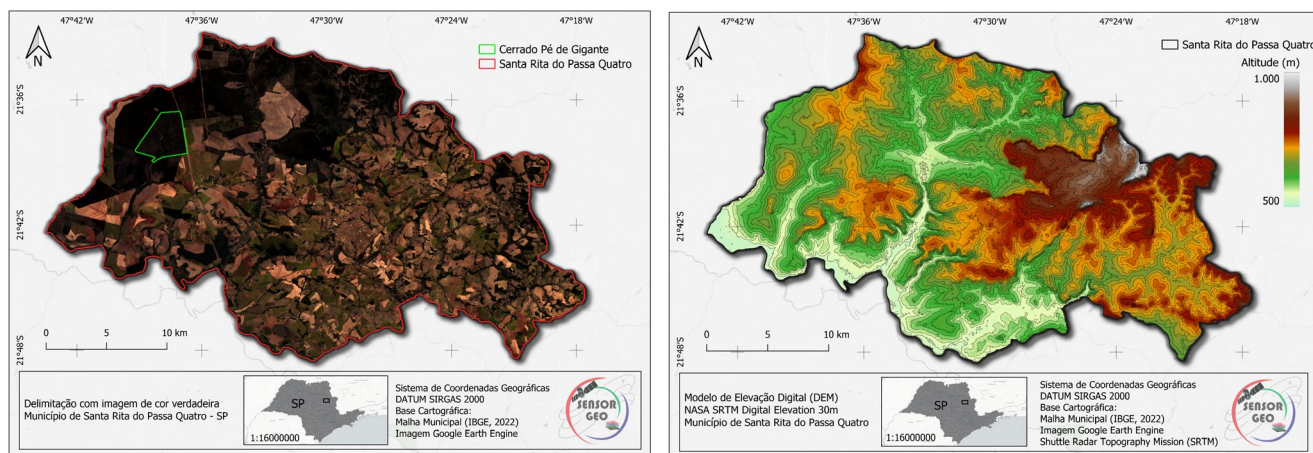
Com o avanço nos campos de análise de dados de satélite nos últimos anos, surgiu a possibilidade de desenvolver o SEBAL em ambientes de computação em nuvem, como o Google Earth Engine (GEE), por ser uma plataforma com grande poder de processamento, possibilita a automação do processo descrito no SEBAL por Bastiaanssen 1988, de forma totalmente autônoma.

O objetivo específico deste estudo é estimar a desenvolver o algoritmo juntamente com os métodos de automação para os processos manuais de calibração, a fim de analisar em conjunto o saldo de radiação e as características físicas das áreas de cerrado e cana de açúcar usando dados *in situ* e estimar dados para a região da bacia do Rio Mogi-Guaçu especificamente no entorno do município de Santa Rita do Passa Quatro - SP, considerando a caracterização dos fatores físicos da região e condições da vegetação ao longo do tempo, o desenvolvimento do algoritmo é baseado no modelo SEBAL e avaliado com dados de superfície para a série temporal de dados do satélite Landsat 5 utilizando o Google Earth Engine (GEE) aliado a análises de geoprocessamento.



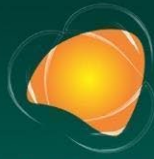
## METODOLOGIA

O município de Santa Rita do Passa Quatro ( $21^{\circ}42'37''S$ ;  $47^{\circ}28'41''W$ ; 748m) tem um clima marcadamente sazonal, com temperaturas médias mensais que variam entre o mês mais quente (fevereiro) e o mês mais frio (junho), com tempo ameno e seco no inverno e quente e úmido no verão (Pires Neto et al., 2005), com destaque na área delimitada pelo município é a presença de Área de Relevante Interesse Ecológico (ARIE) Cerrado Pé de Gigante (PDG), parte do Parque Estadual de Vassununga (Castro, 1987).



**Figura 1** – Localização do município de Santa Rita do Passa Quatro - SP.

A área de recorte do município para o modelo digital de elevação (DEM) é um produto do Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) adquirido no Google Earth Engine com resolução espacial de 30m, utilizando simbologia de falsa cor linear para altitude inserido no software QuantumGis (QGis) versão 3.30.1, sendo um dos dados de entrada necessários do algoritmo na plataforma do Google Earth Engine, o modelo tem mesma resolução espacial dos dados da linha Landsat (30m) está disponível em: [https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/USGS\\_SRTMGL1\\_003](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/USGS_SRTMGL1_003).



## 2.1 – SEBAL EXTREMOS CLIMÁTICOS: IMPACTOS ATUAIS E RISCOS FUTUROS

O SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) é um modelo de processamento remoto utilizado em estudos hidrológicos e agrícolas para estimar a evapotranspiração (ET) das áreas terrestres. Baseado nos princípios de balanço de energia, o SEBAL calcula a ET através de uma série de cálculos. Utilizando imagens de satélite, como as do Landsat, em conjunto com dados climáticos, o SEBAL oferece uma abordagem confiável para monitorar as interações entre a superfície terrestre e a atmosfera, contribuindo para uma melhor compreensão dos ciclos hidrológicos e para a gestão sustentável dos recursos hídricos e agrícolas (Allen et al. 2002).

Os passos realizados para os cálculos e os produtos resultantes de cada variável estão categorizados no fluxograma da figura 3.

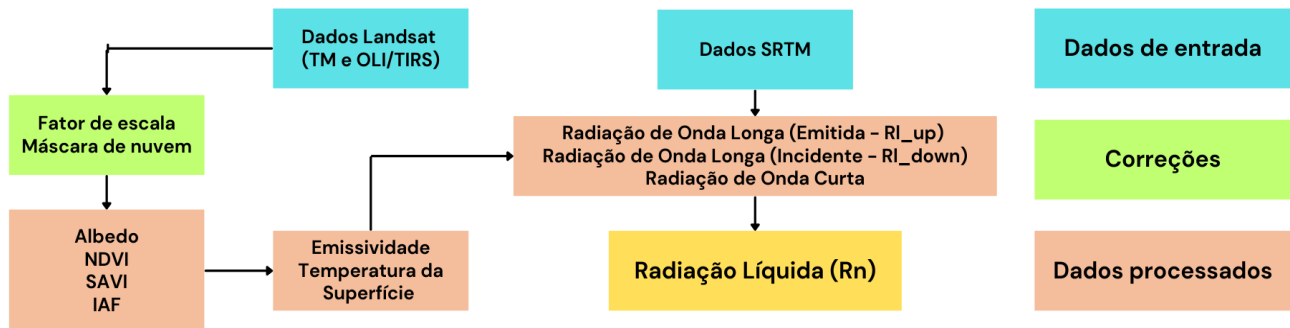


Figura 3 - Fluxograma SEBAL utilizado nos cálculos matriciais

## 2.2 – Albedo no topo da atmosfera ( $\alpha_{toa}$ )

As reflectâncias são ponderadas por meio dos coeficientes pré-determinados ( $W_\lambda$ ) previamente estabelecidos para cada uma das bandas 1 a 7 (com a remoção da banda 6) para o Landsat 5. Em conformidade, a equação a seguir expressa esse cálculo e os elementos interconectados desse processo descrito por Allen et al., 2002 na equação 1:

$$\alpha_{toa} = \Sigma (W_\lambda \times P_\lambda) \quad (1)$$

onde  $W_\lambda$  é o coeficiente de ponderação de cada banda, dado pela equação 5:

$$W_\lambda = \frac{ESUN_\lambda}{\Sigma ESUN_\lambda} \quad (2)$$



Tabela 1 - Coeficientes de ponderação ( $W_{\lambda}$ ) para o Landsat 5 - TM.

	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 7
Landsat 5	0.293	0.274	0.233	0.157	0.033	0.011

Fonte: adaptado de Allen et al., 2002.

### 2.3 – Surface albedo ( $\alpha$ )

Segundo Allen et al., 2002, a determinação do albedo da superfície envolve uma etapa crucial de correção, onde o albedo não ajustado no topo da atmosfera ( $\alpha_{toa}$ ) é adaptado considerando a transmissividade atmosférica. Nesse contexto, o “*apath\_radiance*” (equação 3) desempenha um papel fundamental, representando a fração média da radiação solar recebida em todas as faixas espectrais. O resultado é uma equação que integra esses elementos, permitindo a obtenção de um albedo ajustado, conforme descreve a seguinte equação:

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_{path\ radiance}}{t_{sw}^2} \quad (3)$$

onde  $t_{sw}$  é a transmissividade atmosférica dada pela equação a seguir:

$$t_{sw} = 0.75 + 0.0000275 * z \quad (4)$$

Na equação 4 a variável “Z” é a elevação como uma representação da modelagem topográfica da região de estudo. Neste caso, foi utilizado o modelo de elevação digital “*NASA SRTM Digital Elevation 30m*”. O valor de  $\alpha_{path\ radiance}$  utilizado foi de 0.03 baseado em Bastiaanssen, 1995.

### 2.4 – NDVI

O cálculo do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) normaliza uma diferença de uma feição da vegetação em uma escala de saúde das plantas compreendida entre -1 e 1 para mapear e quantificar o estado da vegetação usando um contraste fotossensível à densidade na região do visível (Vale, 2019). Utilizando as bandas SR\_B4 (Near) e SR\_B3 (Red), é possível operar a função corresponde ao modelo algébrico descrito Allen et al. 2002, utilizando a razão da diferença das refletâncias do infravermelho próximo e do vermelho como:

$$NDVI = \frac{Near - Red}{Near + Red} \quad (5)$$

### 2.5 – SAVI



Este índice corresponde um ajuste em relação ao NDVI, considerando um fator de correção (L), segundo Huete (1988), de 0 a 1, 0,25 para vegetação densa e 0,5 para vegetação com média densidade e 1 para vegetação com baixa densidade.

$$SAVI = \frac{(1+L)*(Near-Red)}{(Near+Red+L)} \quad (6)$$

Segundo Allen et al., 2002, o valor de L pode ser obtido quando não há variação da vegetação, mas há alteração na umidade superficial do solo. Nos cálculos do SAVI (*Soil-adjusted Vegetation Index*), o valor de L = 0.1, conforme sugerido por Allen et al. 2002. Porém, o valor mais frequente é L = 0,5 como um fator de ajuste para a densidade média da vegetação (Boegh et al., 2002).

## 2.6 – IAF

Corresponde ao cálculo do parâmetro biofísico descrita por Allen et al. 2002, dado pela razão entre a área foliar da vegetação por unidade de área ocupada, age como um determinante de biomassa presente na informação matricial da imagem definida como:

$$IAF = \frac{\ln\left(\frac{0.69-SAVI}{0.59}\right)}{0.91} \quad (7)$$

## 2.7 – Emissividade ( $\epsilon$ )

No SEBAL são utilizadas duas taxas de emissividade diferentes (Allen et al., 2002). A primeira corresponde à emissividade, denotada por  $\epsilon_{NB}$ , que caracteriza a emissão térmica de superfícies na faixa relativamente estreita da banda 6. A segunda é a emissividade que representa o comportamento da superfície na faixa mais ampla do espectro térmico, denotada por  $\epsilon_0$ . A emissividade  $\epsilon_{NB}$  é usada para calcular a temperatura da superfície ( $T_s$ ), e  $\epsilon_0$  é então usada para determinar a emissão total de radiação de ondas longas da superfície (Allen et al., 2002).

No algoritmo SEBAL, as emissividades podem ser obtidas, para  $NDVI > 0$  e  $IAF < 3$  conforme descreve a equação 8 e 9 a seguir:

$$\epsilon_{NB} = 0.97 + 0.0033 * IAF \quad (8)$$

$$\epsilon_0 = 0.95 + 0.01 * IAF \quad (9)$$



onde os pixels com  $IAF \geq 3$ ,  $\epsilon_{NB} = \epsilon_{\theta} = 0.98$  e para os corpos de água ( $NDVI < 0$ )  $\epsilon_{NB} = 0.99$  e  $\epsilon_{\theta} = 0.985$ , segundo recomendações de Allen et al. (2002).

## EXTREMOS CLIMÁTICOS: IMPACTOS ATUAIS E RISCOS FUTUROS

### 2.8 – Temperatura da Superfície (Ts)

Originalmente no algoritmo proposto por Allen et al. 2002, a radiação térmica corrigida da superfície ( $R_c$ ) é calculada de acordo com Wukelic et al. (1989) como:

$$R_c = \frac{L_{thermal} - R_p}{t_{NB}} - (1 - \epsilon_{NB})R_{sky} \quad (10)$$

onde  $R_{sky}$  é uma faixa estreita de radiação térmica descendente para condições de céu limpo.

O processamento nativo dos dados para o Landsat 5 disponibilizam uma banda com a radiância térmica já corrigida denominada “ST\_TRAD (W/(m<sup>2</sup>\*sr\*um)/DN)”, utilizada para substituir o cálculo da correção da radiação térmica ( $R_c$ ). Após a correção da radiância para a banda termal do sensor, estimasse a temperatura da superfície ( $T_s$ ) utilizando a seguinte equação de Plank modificada conforme

descreve:

$$T_s = \frac{K2}{\ln\left(\frac{\epsilon_{NB} * K1}{R_c} + 1\right)} \quad (11)$$

onde  $\epsilon_{NB}$  é a emissividade calculada anteriormente;  $R_c$  é a radiância da banda termal dos sensores; K1 e K2 são constantes específicas para imagens do Landsat.

Tabela 2 - Constantes para o Landsat 5 - TM

	K1	K2
<b>Landsat 5 - Banda 6</b>	607.76	1260.56

Fonte: adaptado de Allen et al., 2002.

### 2.9 – Radiação Líquida

Segundo Allen et al. 2002, o fluxo líquido de radiação ( $R_n$ ) é descrito como a quantidade de radiação líquida disposta à superfície capaz de aquecê-la, aquecer o ar ou evaporar a umidade do solo, tendo sua equação dada como:

$$R_n = (1 - \alpha)R_{s_{down}} + R_{l_{down}} - R_{l_{up}} - (1 - \epsilon_{\theta})R_{s_{down}} \quad (12)$$

onde  $\alpha$  é calculado na equação 3 e  $\epsilon_{\theta}$  calculado na equação 9.

]



Os componentes necessários para o cálculo da radiação líquida são:

- $RS_{down}$ : radiação de ondas curtas incidente, dado como:

$RS_{down} = G_{sc} * \cos \theta * dr * t_{sw}$ , onde  $G_{sc}$  é a constante solar ( $1367 W/m^2$ ),  $\cos \theta$  é o cosseno do ângulo de incidência solar,  $dr$  é a distância terra sol e  $t_{sw}$  é a transmissividade atmosférica calculada na equação 4.

- $Rl_{down}$ : radiação de ondas longas incidente, dado como:

$Rl_{down} = 0.85 * (-\ln t_{sw})^{0.09} * \sigma * T_{frio}^4$ , onde  $t_{sw}$  é a transmissividade atmosférica calculada na equação 7,  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $5.67 * 10^{-8} W/m^2/K^4$ ) e  $T_{frio}$  é a temperatura do pixel frio (K) calculada através do CIMEC (Allen et al., 2013).

- $Rl_{up}$ : radiação de ondas longas emitida, dado como:

$Rl_{up} = \epsilon_{\theta} * \sigma * T_s^4$ , onde  $\epsilon_{\theta}$  é a emissividade calculada na equação 9,  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $5.67 * 10^{-8} W/m^2/K^4$ ) e  $T_s$  é a temperatura da superfície (K).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As figuras 4 e 5 caracterizam a distribuição espacial do saldo de radiação líquida (Rn) em superfície para os anos de 2005, comparando o Rn entre o período seco e úmido. Nas imagens do período úmido de 2005 (22/02 e 10/03) o valor de Rn varia predominantemente entre 500 e 600  $W/m^2$ , com áreas menores variando entre 300 e 400  $W/m^2$ . Em seu período seco de 2005 (29/05 e 14/06) o valor de Rn contrasta com o período úmido, com valores de Rn entre 300 e 450  $W/m^2$ .

Gomes (2009), em suas análises com o modelo SEBAL/METRIC, revelou configurações similares para as imagens de 2005, com valores máximos e mínimos de 375,1 e 711,8  $W/m^2$  em 22/02/2005 no período seco, e mínimos de 207,9 e 448,1  $W/m^2$  em 16/07/2005, confirmando a faixa comportamental de valores para o saldo de radiação em seus respectivos períodos.

Além disso, estudos realizados por Giongo (2008) evidenciaram o mesmo padrão sazonal do saldo de radiação em uma parte do município. Ao examinar períodos que englobam os períodos de calor e frio, os valores de Rn oscilaram entre 550 e 650  $W/m^2$  nas proximidades do Cerrado Pé de





Gigante, resultados que corroboram as pesquisas realizadas por Coldibeli (2019), que estabeleceu o saldo de radiação no dia 22 de fevereiro de 2005 e calculou o Rn para analisar os valores em um local específico no Cerrado Pé de Gigante (21°42'37"S e 47°28'41"O), com Rn de 579,220 W/m<sup>2</sup>, solidificando o método desenvolvido neste estudo.

O que se pode inferir sobre as modificações no comportamento de Rn em relação a sua configuração em superfície, são as alterações de áreas vegetadas para áreas de solo exposto, seja a mudança de cerrado nativo para áreas de eucalipto, cana de açúcar ou área habitada, como consequência, a fração de radiação refletida é considerada no balanço de radiação em superfície, resultando em um saldo de radiação líquida (Rn) menor nessas áreas, superfícies impermeáveis, comuns em áreas urbanas, aumentam o albedo e reduzem a absorção de radiação, enquanto práticas agrícolas podem tanto aumentar quanto diminuir o albedo dependendo do tipo de cultura e do manejo do solo.

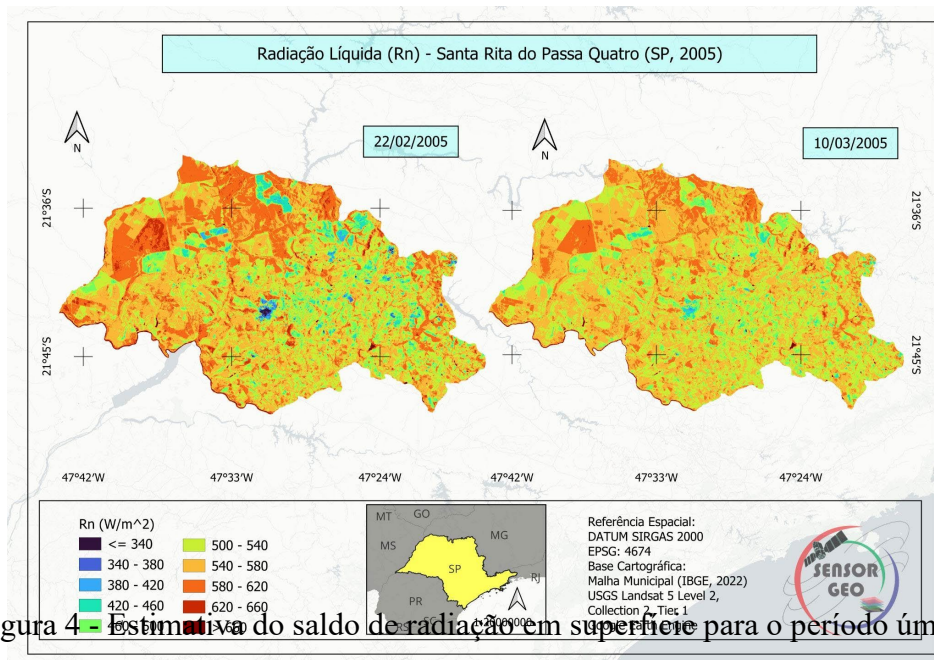
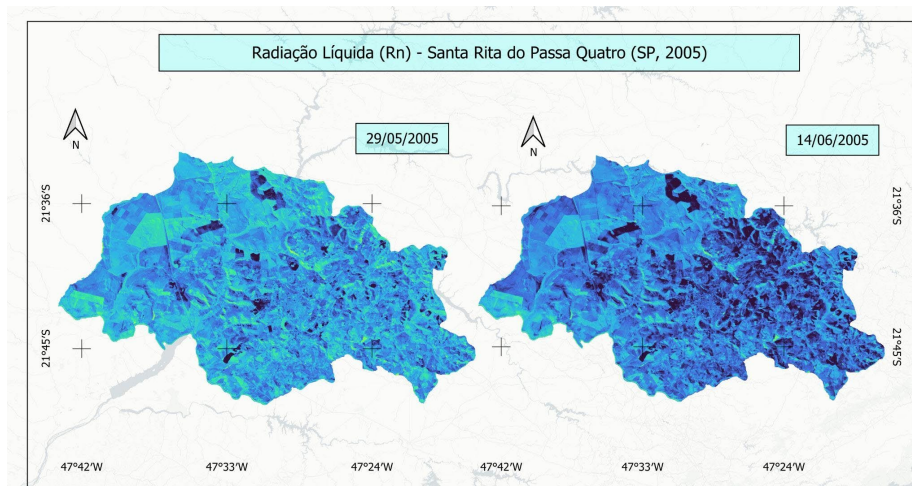


Figura 4 - Estimativa do saldo de radiação em superfície para o período úmido



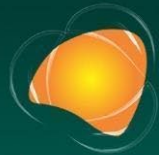


Figura 5 - Estimativa do saldo de radiação em superfície para o período seco

O alvo espectral de aferição demarcado na estação micrometeorológica no Cerrado Pé de Gigante (21°37'55.3"S, 47°37'43.1"W) contém medidas *in situ* do saldo de radiação adquiridos via sensor Saldo radiômetro REBS para todo o ano de 2005, cedidos pelo Dr. Humberto Ribeiro da Rocha, do Departamento de Ciências Atmosféricas, Laboratório de Biosfera-Atmosfera (IAG/USP).

Na tabela 3 é possível analisar os erros percentuais de medições de temperatura da superfície e o saldo de radiação, no período úmido (22/02 e 10/03) os valores de erro percentual é baixo na estimativa do Rn, contraponto o período seco, com uma ligeira discrepância, demonstrando maior eficiência para condições atmosféricas ou características específicas do solo no período úmido.

Tabela 3 - Validação do saldo de radiação.

DATAS	Temp. da Superfície (°C)				Rad. Líquida (Rn)			
	Medido	Estimado	Erro(%)	$\sigma$	Medido	Estimado	Erro(%)	$\sigma$
22/02/2005	26.87	25,95	3.42	0.46	603.83	605.01	0.19	0.59
10/03/2005	22.15	22.87	3.14	0.36	578.92	581.02	0.36	1.05
29/05/2005	16.93	18,17	7.32	0.62	353.36	372.53	5.42	9.58
14/06/2005	19.43	20.78	6.94	0.67	275.10	301.71	9.67	13.30

## CONCLUSÕES OU CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos mapas temáticos para a área do município de Santa Rita do Passa Quatro - SP demonstrou um comportamento equilibrado entre as razões nos valores do saldo de radiação (Rn).A



calibração e validação do modelo demonstrou grande precisão nos cálculos do  $R_n$ , com erros percentuais abaixo dos 10% e desvio moderado nas imagens do período seco. A comparação dos dados estimados e os dados *in situ* demonstraram uma consistência notável, fortalecendo a confiabilidade do algoritmo SEBAL.

## EXTREMOS CLIMÁTICOS, IMPACTOS ATUAIS E RISCOS FUTUROS

### AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas (FAPEAL) e à Universidade Federal de Alagoas pelo apoio concedido durante a concepção deste estudo, e para a sua publicação.

### REFERÊNCIAS

ALLEN, R., Tasumi, M. and Trezza, R. (2002) SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land)-Advanced Training and User's Manual-Idaho Implementation, Version 1.0.

ALLEN, Richard G. et al. Automated calibration of the metric-landsat evapotranspiration process. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, v. 49, n. 3, p. 563-576, 2013.

BASTIAANSEN, W.G.M. 1995. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates. Ph.D. dissertation, CIP Data Koninklijke Bibliotheek, Den Haag, The Netherlands. 273 p.

BASTIAANSEN, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A., Holtslag, A.A.M., 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. J. Hydrol. 212-213, 198-212. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4)

BOEGH, Eva, Henrik Soegaard, and Anton Thomsen. "Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance." Remote Sensing of Environment 79.2-3 (2002): 329-343.

CASTRO, Antônio Alberto Jorge Farias. Florística e fitossociologia de um cerrado marginal brasileiro, parque estadual de Vaçununga, Santa Rita do Passa Quatro. Diss. [sn], 1987.

COLDIBELI, Matheus Costa et al. Automatização do Cálculo do Balanço de Radiação Eletromagnética a partir de Imagens Landsat 5. 2019.

CLASS, Terra. Projeto Terra Class Cerrado 2013.



GIONGO, Pedro Rogério et al. Estimativa do balanço de radiação com técnicas de sensoriamento remoto e dados de superfície. 2008.

## **EXTREMOS CLIMÁTICOS: IMPACTOS ATUAIS E RISCOS FUTUROS**

GOMES, H. B. Balanços de radiação e energia em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e cerrado no Estado de São Paulo mediante imagens orbitais. 2009. 108 p. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

Google Earth Engine, 2024. Disponível em: <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/landsat>, acessado em: 13/08/2024

HUETE, Alfredo R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote sensing of environment, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988.

IBGE, Mapa de Biomas e de Vegetação, 2004. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/vegetacao/15842-biomas.html?edicao=16060&t=acesso-ao-produto>. Acesso em: 13/08/2024

PIRES NETO, A. G., ROCHA, H. R., COOPER, M. & SHIDA, C. N. Caracterização física do Cerrado Pé-de-Gigante e uso das terras na região: 1. Fisiografia da região. In: V. R. Pivello & E. M. Varanda (eds.). O cerrado do Pé-de-Gigante: Ecologia e Conservação – Parque Estadual de Vassununga. Imprensa Oficial do Estado de São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente (SMA), São Paulo, pp. 15 – 28, 2005.

VALE, Jones Remo Barbosa et al. Análise da dinâmica do uso e cobertura da terra nas áreas desflorestadas do Estado do Pará por meio da Plataforma Google Earth Engine. 2019.

WUKELIC, G. E. et al. Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper thermal band. Remote sensing of environment, v. 28, p. 339-347, 1989.