

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE ANGICOS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO
CURSO DE INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (2025.2)

**SISTEMA DE MONITORAMENTO CLIMÁTICO DA MICRORREGIÃO DO
VALE DO AÇU**

*Antonio Manoel Fernandes Xavier**

*Oswaldo Nogueira de Sousa Neto***

RESUMO: A Bacia Hidrográfica do Vale do Açu, inserida no semiárido do Rio Grande do Norte, desempenha um papel estratégico no abastecimento e desenvolvimento regional, mas enfrenta desafios críticos quanto à gestão racional e distribuição de seus recursos hídricos públicos. A escassez de uma plataforma unificada que integre dados climáticos e hidrológicos em tempo real dificulta a tomada de decisão por parte dos gestores públicos e dos usuários da bacia. O objetivo deste trabalho foi desenvolver uma ferramenta interativa de monitoramento climático voltada, primordialmente, para auxiliar na gestão dos recursos hídricos públicos da bacia e, por extensão, na otimização da gestão agrícola local. A metodologia utilizou a plataforma Google Earth Engine (GEE) para processar dados de precipitação (CHIRPS Daily), temperatura e evapotranspiração (ERA5-Land e MODIS), essenciais para o balanço hídrico regional. As informações foram integradas em um ambiente web acessível, permitindo o acompanhamento de séries históricas e tendências atuais. Os resultados demonstram que o sistema oferece subsídios precisos para o monitoramento da segurança hídrica na bacia, apoiando tanto a administração pública na conservação da água quanto o setor produtivo na eficiência do uso deste recurso.

Palavras-chave: Recursos Hídricos. Bacia do Vale do Açu. Google Earth Engine (GEE). Monitoramento.

ABSTRACT: The Açu Valley Hydrographic Basin, located in the semi-arid region of Rio Grande do Norte, plays a strategic role in regional supply and development; however, it faces critical challenges regarding the rational management and distribution of its public water resources. The scarcity of a unified platform that integrates real-time climatic and hydrological data hinders decision-making by public managers and basin users. The objective of this study was to develop an interactive climate monitoring tool aimed primarily at assisting in the management of the basin's public water resources and, by extension, optimizing local agricultural management. The methodology employed the Google Earth Engine (GEE) platform to process precipitation (CHIRPS Daily), temperature, and evapotranspiration (ERA5-Land and MODIS) data, which are essential for the regional water balance. The processed information was integrated into an accessible web-based environment, allowing for the monitoring of historical series and current trends. The results demonstrate that the system provides accurate support for monitoring water security in the basin, aiding both public administration in water conservation and the productive sector in the efficient use of this resource.

Keywords: Water Resources. Açu Valley Basin. Google Earth Engine (GEE). Monitoring.

1 INTRODUÇÃO

A Bacia Hidrográfica do Vale do Açu, situada no semiárido do estado do Rio Grande do Norte, representa um dos sistemas hídricos mais estratégicos para o desenvolvimento regional. Inserida no bioma Caatinga, a bacia possui um clima marcado por temperaturas médias elevadas em torno de 28°C, chuvas escassas e concentradas em poucos meses do ano, e uma alta taxa de evapotranspiração que frequentemente supera a precipitação, resultando em um balanço hídrico historicamente negativo. Este cenário impõe desafios severos à gestão pública dos recursos naturais, exigindo que a administração das águas superficiais e subterrâneas, como as do Aquífero Açu e do rio Piranhas-Açu, seja realizada com extremo rigor para garantir a segurança hídrica da população e dos múltiplos usos da água (EMBRAPA, 2025).

Nesse cenário de vulnerabilidade hídrica, a implementação de ferramentas tecnológicas capazes de centralizar e processar dados ambientais torna-se indispensável para a governança da bacia. A plataforma desenvolvida neste trabalho propõe-se a atuar como um sistema de suporte à decisão, projetado especificamente para auxiliar no monitoramento dos recursos hídricos públicos. Ao integrar variáveis críticas como precipitação, temperatura e evapotranspiração em um ambiente unificado e acessível, a ferramenta busca fornecer aos órgãos gestores e à sociedade uma visão clara e atualizada da disponibilidade hídrica de referência. Isso permite que o planejamento do uso da água seja pautado em dados técnicos precisos, facilitando a identificação de anomalias climáticas e promovendo uma alocação mais justa e eficiente do recurso.

A economia da região tem forte influência da agricultura irrigada, responsável por uma parcela importante da produção de fruticultura do estado, abastecendo mercados internos e externos. No entanto, a expansão desta atividade intensiva em uso de água, em um contexto de escassez, gera uma crescente pressão sobre os recursos hídricos públicos superficiais e subterrâneos. O uso indiscriminado ou não monitorado pode levar ao colapso do abastecimento, tornando a gestão hídrica integrada um fator crítico não apenas para a sustentabilidade agrícola, mas para a sobrevivência da bacia como um todo (AGN - CENTRAL DO INVESTIDOR, 2025)

Atualmente, há diversos sistemas de monitoramento climático de regiões específicas pelo Brasil, como por exemplo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), sendo este o órgão oficial de meteorologia, onde há diversas estações meteorológicas responsáveis por coletar e processar dados a serem disseminados para o país. O monitoramento contínuo é vital

para fornecer informações úteis à sociedade e à gestão de recursos naturais. Outro exemplo é o Agritempo, capaz de realizar o monitoramento meteorológico e agrometeorológico. Contudo, há uma carência de ferramentas que integrem esses dados especificamente para o suporte à decisão na gestão pública de bacias em nível local e regional, com a granularidade necessária para o Vale do Açu (GOES, et al., 2023).

Nesse contexto, o Google Earth Engine (GEE) surge como uma plataforma de computação revolucionária para análise geoespacial aplicada à gestão hídrica. Pesquisas indicam que, através do GEE, é possível obter informações sobre a demanda hidrológica no Vale do Açu, bem como alterações na vegetação e índices pluviométricos. A capacidade da plataforma de processar grandes volumes de dados geoespaciais em nuvem permite democratizar o acesso a informações críticas, dispensando infraestrutura robusta e facilitando a atuação de comitês de bacia e gestores públicos na fiscalização e planejamento.

Dentro dessa perspectiva tecnológica, estabelece-se como premissa fundamental para o sucesso do monitoramento climático a análise rigorosa de duas variáveis determinantes para o ciclo hidrológico: a evapotranspiração e o ponto de orvalho. A evapotranspiração, ao quantificar o volume total de água transferido do solo e da vegetação para a atmosfera, atua como o principal indicador de "saída" ou consumo hídrico da bacia, sendo vital para o cálculo do balanço hídrico de referência. Simultaneamente, o ponto de orvalho oferece uma métrica precisa sobre a saturação de umidade do ar, indicando as condições reais de demanda atmosférica. A integração dessas informações é o que permite aos gestores públicos não apenas reagir à seca, mas antecipar cenários de estresse hídrico, garantindo uma gestão preventiva e eficiente dos reservatórios públicos.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi desenvolver uma ferramenta interativa de monitoramento climático voltada para a Bacia Hidrográfica do Vale do Açu. Utilizando o Google Earth Engine (GEE), o sistema coleta e processa dados de evapotranspiração, temperatura e precipitação para fornecer subsídios técnicos à gestão pública dos recursos hídricos. A ferramenta visa permitir uma administração mais eficiente da água, auxiliando, por extensão, a gestão agrícola a se adaptar à disponibilidade hídrica da bacia, mitigando conflitos e promovendo a sustentabilidade regional.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Google Earth Engine (GEE) como Plataforma de Análise Geoespacial

O Google Earth Engine (GEE) é uma plataforma de computação em nuvem lançada em 2010, projetada para o armazenamento e processamento de dados de sensoriamento remoto em escala global. Segundo Righi et al. (2022), o GEE surgiu como uma alternativa promissora para superar as limitações do processamento tradicional, permitindo a análise de grandes áreas por amplos períodos temporais. A plataforma funciona através de uma interface baseada em programação, utilizando prioritariamente a linguagem JavaScript em seu Editor de Código (API), embora também suporte integração com Python, facilitando a aplicação de algoritmos complexos de forma otimizada (RIGHI et al., 2022).

A arquitetura do GEE baseia-se em um catálogo multi-petabyte de dados públicos, que integra séries históricas de satélites como Landsat, Sentinel e MODIS. De acordo com Santino e Chaves (2021), o diferencial tecnológico da plataforma reside no fato de os dados estarem hospedados diretamente nos servidores do Google, o que reduz drasticamente os custos operacionais e o tempo de execução, uma vez que não é necessário realizar o download das imagens para processamento local. Essa estrutura permite que o usuário utilize o poder de processamento paralelo da infraestrutura do Google para executar tarefas que seriam inviáveis em computadores convencionais (SANTINO; CHAVES, 2021).

Além da agilidade no processamento, o GEE destaca-se pela integração de algoritmos de aprendizado de máquina (machine learning), como o Random Forest, para classificações supervisionadas de uso e cobertura do solo. Conforme apontam Santino e Chaves (2021), a utilização dessas ferramentas dentro do ambiente GEE permite monitorar fenômenos dinâmicos, como a expansão da mancha urbana, com alta precisão e eficiência. Isso ocorre porque a plataforma automatiza etapas de pré-processamento, como a correção atmosférica e a filtragem de nuvens, que são gargalos comuns no sensoriamento remoto (SANTINO; CHAVES, 2021).

Por fim, a relevância do GEE no cenário científico atual é consolidada por sua capacidade de democratizar o acesso à análise geoespacial avançada. Righi et al. (2022) ressaltam que, por ser uma ferramenta gratuita para fins acadêmicos e de pesquisa, o GEE impulsionou a produção científica ao permitir que pesquisadores de diferentes regiões do globo acessem dados geoespaciais e capacidade computacional de alto desempenho sem a necessidade de investimentos em hardware robusto. Dessa forma, a plataforma estabelece-se

como o estado da arte para estudos de mudanças climáticas, gestão de recursos hídricos e monitoramento ambiental em tempo quase real (RIGHI et al., 2022).

2.2 Monitoramento Climático e Hídrico com GEE no Semiárido

O monitoramento contínuo de variáveis climáticas é um pilar estruturante para a governança hídrica, especialmente em regiões semiáridas onde a oferta de água é intermitente e a demanda é crescente. A plataforma Google Earth Engine (GEE) desempenha um papel estratégico ao democratizar o acesso a conjuntos de dados globais de climatologia e hidrologia, fornecendo aos gestores públicos e comitês de bacia as ferramentas necessárias para calcular o balanço hídrico regional. As principais bases de dados utilizadas para este fim incluem:

1. **Dados de Reanálise (ERA5-Land):** O ERA5-Land é um inventário de reanálise climática global desenvolvido pelo Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF). Ele fornece estimativas de variáveis atmosféricas e terrestres, como pressão barométrica, ponto de orvalho e temperatura do ar a 2 m, com resolução espacial de 9 km ($0,1^\circ$) e alta frequência temporal. A integração desses dados ao Google Earth Engine (GEE) viabiliza o estudo de padrões históricos e a extração de indicadores fundamentais, como temperaturas máximas e mínimas. Tais parâmetros são determinantes para o cálculo da demanda evaporativa e monitoramento hídrico, suprimindo a carência de estações físicas em áreas de difícil acesso (EEDC, 2025).
2. **Dados de Precipitação (CHIRPS Daily):** O CHIRPS disponibiliza um inventário pluviométrico de escala quase global com séries históricas superiores a três décadas. Este sistema integra sensores de infravermelho de alta resolução ($0,05^\circ$) a registros de pluviômetros terrestres para a geração de grades de dados. Devido ao seu elevado rigor técnico, constitui uma alternativa viável para a fiscalização de chuvas em áreas com monitoramento físico deficitário, a exemplo da região semiárida do Brasil (COSTA et al., 2019).
3. **Evapotranspiração (ET):** A evapotranspiração (ET) corresponde à perda de água para a atmosfera, somando a evaporação direta da superfície do solo e a transpiração da vegetação, sendo a variável determinante para definir a demanda hídrica no manejo da irrigação. O Google Earth Engine (GEE) facilita esse monitoramento ao disponibilizar produtos globais prontos, como o MOD16, que aplica a lógica de Penman-Monteith para estimar a evapotranspiração da vegetação terrestre de forma contínua, e o SSEBop, que

utiliza dados térmicos e um modelo simplificado de balanço de energia para fornecer estimativas operacionais rápidas em grandes áreas. Além desses produtos, a plataforma viabiliza a implementação de algoritmos robustos como o GEESEBAL, capaz de processar imagens de satélite para gerar séries temporais detalhadas de ET. Ao cruzar esses dados de sensoriamento remoto com variáveis climáticas locais, como temperatura e radiação, obtém-se um cálculo muito mais preciso tanto da evapotranspiração de referência (ET_o) quanto da evapotranspiração real da cultura (ET_c)(EEDC, 2025).

2.3 Limitações e Desafios Operacionais do GEE na Gestão Hídrica

Embora o Google Earth Engine represente um avanço significativo para o monitoramento remoto, sua aplicação na gestão de recursos hídricos públicos impõe desafios que devem ser considerados pelos tomadores de decisão. A principal limitação reside na resolução espacial dos produtos globais. Dados de reanálise como o ERA5-Land, embora precisos para escalas regionais e de bacia, possuem uma resolução de aproximadamente 9 km. Isso significa que variações microclimáticas muito locais (dentro de uma única propriedade rural ou pequeno açude) podem ser generalizadas, exigindo cautela ao aplicar os dados para ações de fiscalização pontual (MUÑOZ-SABATER et al., 2021).

Outro fator crítico para a gestão pública é a latência dos dados. Diferente de estações telemétricas que transmitem em tempo real, produtos de satélite processados (como o CHIRPS e MOD16) possuem um intervalo de tempo entre a coleta, o processamento e a disponibilidade na nuvem (variando de dias a semanas). Para a gestão de crises agudas, como enchentes repentinas ou ruptura de barragens, essa latência pode limitar a capacidade de resposta imediata, posicionando o GEE mais como uma ferramenta de planejamento tático e estratégico do que operacional instantâneo (FUNK et al., 2015; GORELICK et al., 2017).

3 Materiais e Métodos

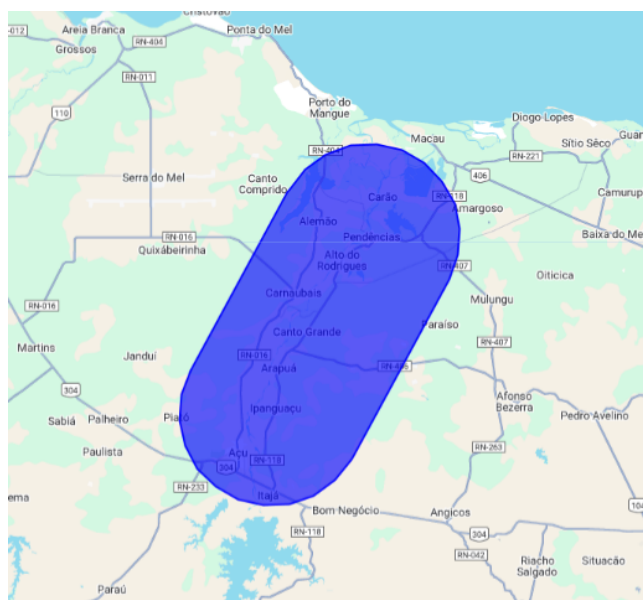
3.1 Área de Estudo

Este trabalho consiste no desenvolvimento de uma aplicação web de monitoramento hidroclimático voltada para o suporte à tomada de decisão na gestão dos recursos hídricos. A área de estudo compreende a microrregião do Vale do Açu, localizada no estado do Rio Grande do Norte, abrangendo uma extensão territorial de 4.756,1 km² (ADUERN, 2025).

A região desempenha um papel central na segurança hídrica do estado, abrigando a Barragem Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves, o maior reservatório do Rio Grande do

Norte e infraestrutura vital da bacia hidrográfica do Rio Piranhas-Açu. A presença deste reservatório confere à região uma disponibilidade hídrica estratégica, que atrai múltiplos usos, desde o abastecimento humano até a agroindústria. Consequentemente, a área torna-se um cenário de alta complexidade para a gestão pública, onde o monitoramento contínuo é necessário para garantir o equilíbrio entre a oferta de água e a demanda crescente. Para a análise dos resultados, foi delimitado um polígono de interesse focado no corredor entre os municípios de Itajá e Pendências, abrangendo uma faixa de 30 km, numa direção rumo a nordeste, que representa uma área de intensa atividade de irrigação, conforme mostra a figura abaixo.

Figura 1 – Área selecionada do Vale do Açu



Fonte: Google Earth Engine, 2025

3.2 Coleta e Processamento de Dados no Google Earth Engine

O desenvolvimento do sistema de monitoramento foi centrado na plataforma Google Earth Engine (GEE), utilizando a linguagem de programação JavaScript no Code Editor do GEE. A metodologia seguiu as seguintes etapas a seguir.

3.3 Seleção dos Datasets:

Foram selecionados três conjuntos de dados principais, disponíveis no catálogo público do GEE, para o monitoramento das variáveis climáticas essenciais:

- **Temperatura (Média, Superfície e Ponto de Orvalho):** ERA5-Land Daily Aggregated (ECMWF/ERA5_LAND/DAILY_AGGR).

Variáveis utilizadas: temperature_2m , skin_temperature , dewpoint_temperature_2m .

- **Precipitação:** CHIRPS Daily (UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY).

Variável utilizada: precipitation .

- **Radiação Solar:** GLDAS NOAH V2.1 (NASA/GLDAS/V021/NOAH/G025/T12).

Variável utilizada: SWdown_f_tavg (Radiação de Onda Curta Descendente).

- **Evapotranspiração (ET):** MODIS/051/MOD16A2 (Evapotranspiração e Evaporação de 8 dias).

3.4 Rotina de Coleta e Agregação: Foi elaborada uma rotina de código GEE para acessar e processar as informações mais recentes, com foco nos últimos 6 meses de dados. O código realiza as seguintes operações:

- **Filtro Espacial:** Aplicação do polígono de interesse (Vale do Açu) para restringir a análise à área de estudo.
- **Filtro Temporal:** Definição do período de análise (últimos 6 meses).
- **Agregação Temporal:** Os dados diários foram agregados em médias ou somas mensais (média para temperatura e radiação; soma para precipitação) para facilitar a visualização de tendências sazonais.
- **Conversão de Unidades:** Variáveis como temperatura e ponto de orvalho, originalmente em Kelvin, foram convertidas para Graus Celsius (°C). A pressão atmosférica foi convertida de Pascal (Pa) para Hectopascal (hPa).

3.5 Cálculo da Evapotranspiração Histórica e Diária: Um componente crucial do sistema foi a análise da Evapotranspiração em relação ao seu padrão histórico:

- **Média Histórica:** Calculada a média da evapotranspiração (MOD16A2) para os últimos 30 anos na área de estudo, servindo como linha de base climatológica.
- **Evapotranspiração Recente:** O sistema busca a imagem MOD16A2 mais recente (dos últimos 16 dias, devido à resolução temporal do produto) e calcula a média da ET na área de interesse. Se não houver dados recentes, a média histórica é utilizada como fallback.
- **Probabilidade Relativa:** É calculada a probabilidade da ET recente em comparação com a média histórica, utilizando a fórmula:

$$\text{Probabilidade} = \frac{ET_{\text{ontem}}}{ET_{\text{histórica}}} \times 100$$

- **Análise:** Prob < 100%: ET recente inferior à média histórica (indicado pela cor verde e seta para baixo).

Prob > 100%: ET recente superior à média histórica (indicador vermelho, seta para cima).

- **Unidade e sentido:** o valor é adimensional (percentual). Ele não é uma "probabilidade" no contexto estatístico tradicional, mas sim um índice percentual de anomalia relativa. Em termos práticos, quanto maior que 100%, maior a configuração hídrica necessária para a supervisão; quanto menor que 100%, menor.

3.5 Integração Web e Visualização

Após o processamento no GEE, os dados agregados foram exportados para um ambiente web (Google Sites) apenas para facilitar a visualização do usuário final dos programas criados dentro do GEE. Finalizando, com a configuração do endereço web desenvolvido para integrar e disponibilizar as informações. O sistema foi projetado para exibir os dados de forma clara e acessível, incluindo gráficos de séries temporais para cada variável climática, permitindo a visualização de tendências e históricos.

3.6 Análise de Resultados

A análise dos resultados foi conduzida de maneira integrada à aquisição e processamento dos dados, visando validar a eficácia da ferramenta como um instrumento de suporte à governança hídrica. A validação do sistema baseia-se na interpretação das séries temporais geradas, verificando a coerência dos padrões hidrometeorológicos observados com o regime semiárido característico da Bacia do Vale do Açu.

A interpretação dos dados prioriza a relevância de cada variável para o balanço hídrico regional. Buscando identificar, através dos gráficos, os momentos críticos de desequilíbrio entre a oferta de água (precipitação) e a demanda atmosférica (evapotranspiração e temperatura), informações vitais para a tomada de decisão por parte dos gestores públicos.

O código GEE foi elaborado para acessar e processar as informações mais recentes disponibilizadas nos datacenters do Google Earth Engine. Posteriormente, foi desenvolvido um site para integrar e disponibilizar as informações coletadas, garantindo que o sistema exiba os dados de forma clara e acessível, incluindo gráficos completos das informações climáticas. A análise dos resultados ocorre simultaneamente à aquisição dos dados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O sistema desenvolvido no Google Earth Engine processa dados climáticos para o corredor entre Itajá e Pendências, no Vale do Açu, abrangendo o período dos últimos 6 meses (Julho a Dezembro). A análise das séries temporais geradas não apenas revela as condições agrícolas locais, mas fornece um diagnóstico do comportamento hidrológico da bacia, oferecendo conclusões para a gestão pública dos recursos hídricos e o planejamento sustentável do uso da água.

5.1 Análise das Variáveis Climáticas

A Tabela 1 resume as variáveis analisadas, os datasets utilizados e a importância

estratégica de cada uma para o monitoramento da segurança hídrica na microrregião.

Tabela 1: Resumo das variáveis climáticas monitoradas e sua relevância para a gestão hídrica.

Variável	Dataset GEE	Unidade	Tendência Observada (Jul-Nov)	Relevância para a Gestão Hídrica Pública
Temperatura Média Mensal	ERA5-Land Daily-Aggregated	°C	Leve aumento (27,5°C para 29°C)	Monitoramento da evaporação em espelhos d'água (açudes) e demanda humana/animal.
Temperatura da Superfície (Proxy Máxima)	ERA5-Land Daily-Aggregated	°C	Aumento consistente (29°C para 33,5°C)	Indicador de ressecamento do solo, risco de degradação ambiental e aumento da demanda hídrica para manutenção da umidade.
Ponto de Orvalho (Proxy Mínima)	ERA5-Land Daily-Aggregated	°C	Queda (Jul Set) e Subida (Nov)	Indicador de saturação do ar; valores baixos indicam alta capacidade atmosférica de "retirar" água do sistema (alta demanda)
Radiação Solar Mensal	GLDAS NOAH V2.1	W/m²	Aumento (220 W/m² para 300 W/m²)	Principal motor energético da evaporação. Dimensionamento de perdas hídricas em canais abertos e reservatórios.
Precipitação Mensal	CHIRPS Daily	mm/mês	Queda acentuada (20mm para 0mm)	Avaliação da recarga de aquíferos e reservatórios. Período crítico de dependência total de estoques hídricos.

Pressão	ERA5-Land	hPa	Leve	Auxílio na previsão de
Atmosférica	Daily		aumento	sistemas meteorológicos e
Mensal	Aggregated		(Ago) seguido de queda (Nov)	frentes de instabilidade.

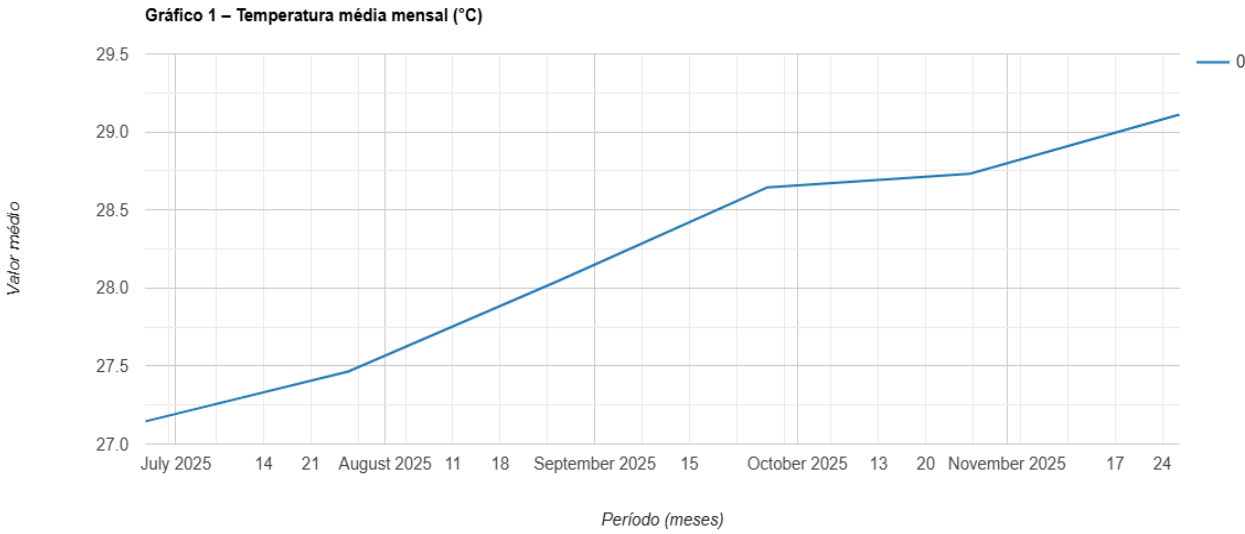
O monitoramento das variáveis térmicas e radiativas revelou uma intensificação progressiva da demanda atmosférica sobre a bacia entre julho e novembro. Os dados obtidos indicaram um aumento consistente na temperatura da superfície, que atingiu médias mensais de 33,5°. Sob a ótica da gestão pública, esse cenário configura um período crítico de perda hídrica, onde a evaporação em reservatórios e a transpiração da cobertura vegetal atingem seus picos, exigindo rigor no controle de outorgas e na distribuição de água.

No que tange ao balanço hídrico, os resultados confirmam a vulnerabilidade do sistema durante o segundo semestre. A precipitação mensal decresceu de 20 mm para 0 mm, indicando a interrupção total da recarga natural dos aquíferos e reservatórios locais. Isso impõe uma dependência absoluta das reservas acumuladas (como a Barragem Armando Ribeiro Gonçalves) para o abastecimento humano e a manutenção das atividades produtivas no corredor Itajá-Pendências.

5.1.1 Temperatura e Demanda Evaporativa

Os gráficos de temperatura (Média e Superfície) revelaram uma tendência de aquecimento sazonal, típica do período seco e pré-chuvoso do semiárido. A temperatura média mensal aumentou de aproximadamente 27,5°C para 29°C, enquanto a temperatura da superfície (um indicador dos picos térmicos diurnos) subiu de 29°C para 33,5°C.

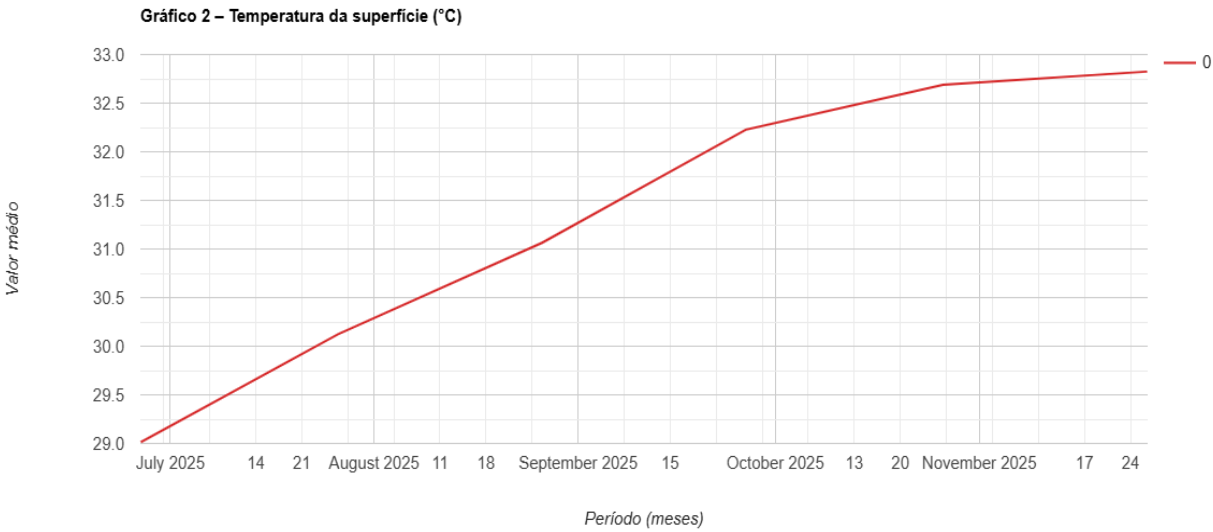
Gráfico 1 – Temperatura média mensal



Fonte: Google Earth Engine, 2025

O aumento da temperatura da superfície é um indicador direto do aumento da demanda evaporativa da bacia. Para o gestor hídrico, esse dado sinaliza que cada metro cúbico de água exposto ou aplicado no solo sofrerá perdas rápidas para a atmosfera. O sistema alerta, portanto, para a necessidade de restringir usos menos eficientes e priorizar horários de irrigação com menor carga térmica, visando a conservação do volume armazenado nos mananciais públicos.

Gráfico 2 – Temperatura da superfície

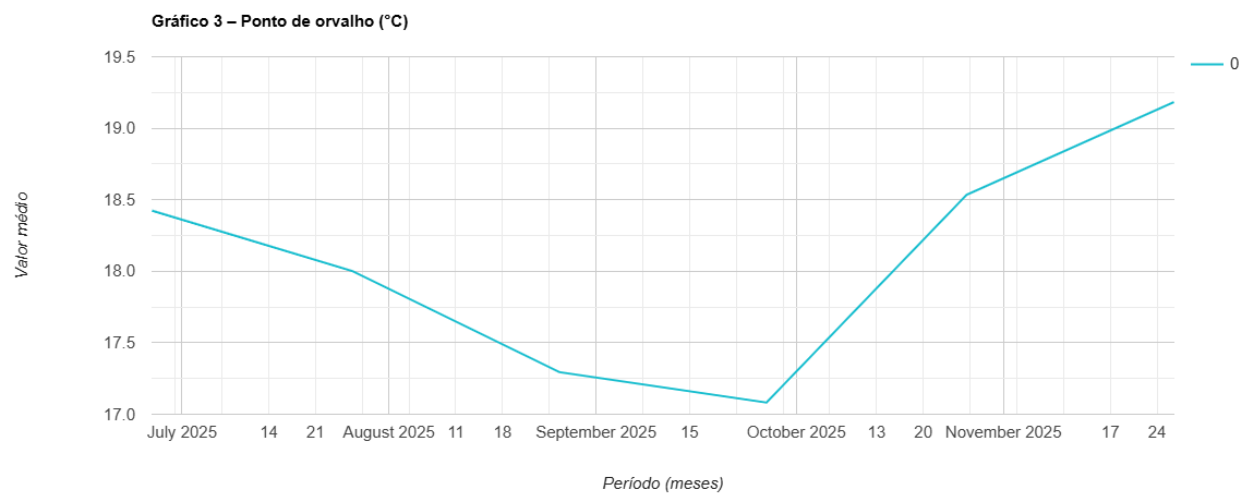


Fonte: Google Earth Engine, 2025

5.1.2 Ponto de Orvalho

O ponto de orvalho, um proxy para a umidade do ar e a temperatura mínima, apresentou uma queda de julho a setembro, indicando o pico da estação seca e a menor umidade atmosférica. A recuperação em novembro sugere a transição para o período chuvoso.

Gráfico 3 – Ponto de orvalho



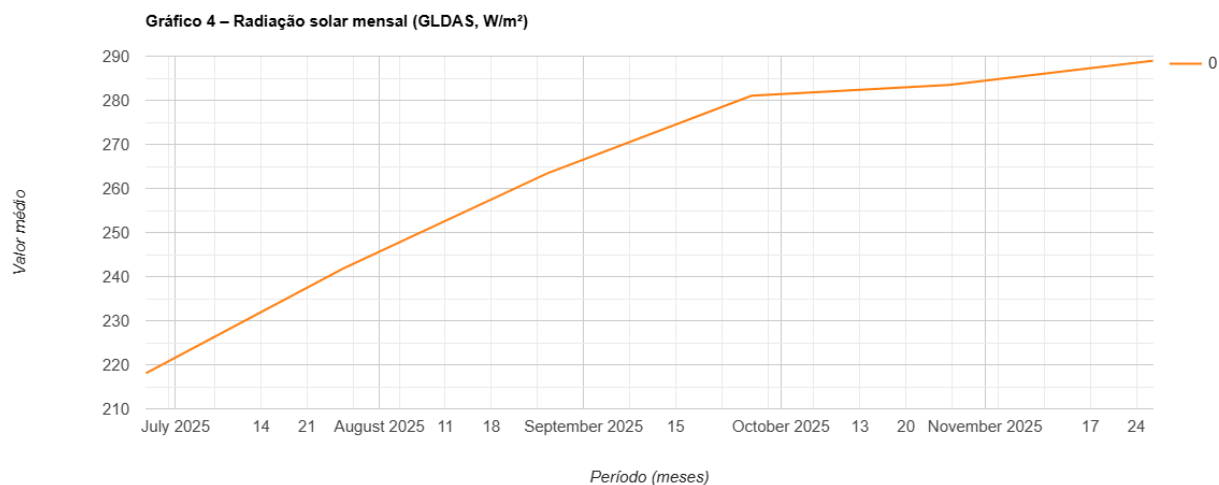
Fonte: Google Earth Engine, 2025

O ponto de orvalho serve como um termômetro da "sede" da atmosfera. Pontos de orvalho baixos (ar seco) durante o pico da seca indicam que a taxa de evaporação potencial está em seu máximo, acelerando o rebaixamento dos níveis dos reservatórios e exigindo maior volume de água para suprir a mesma demanda agrícola e ambiental.

5.1.3 Radiação Solar e Produtividade

A radiação solar mensal, medida em Watts por metro quadrado (W/m²), mostrou um aumento significativo de 220 W/m² para 300 W/m² entre julho e novembro. Este aumento implica em maior carga térmica sobre os corpos d'água da bacia, acelerando a evaporação física. O dado é crucial para o planejamento de operação de reservatórios, pois permite estimar as perdas inevitáveis por evaporação e ajustar a vazão liberada para os usuários a jusante, garantindo que a água chegue ao destino final nas quantidades outorgadas.

Gráfico 4 – Radiação Solar Mensal

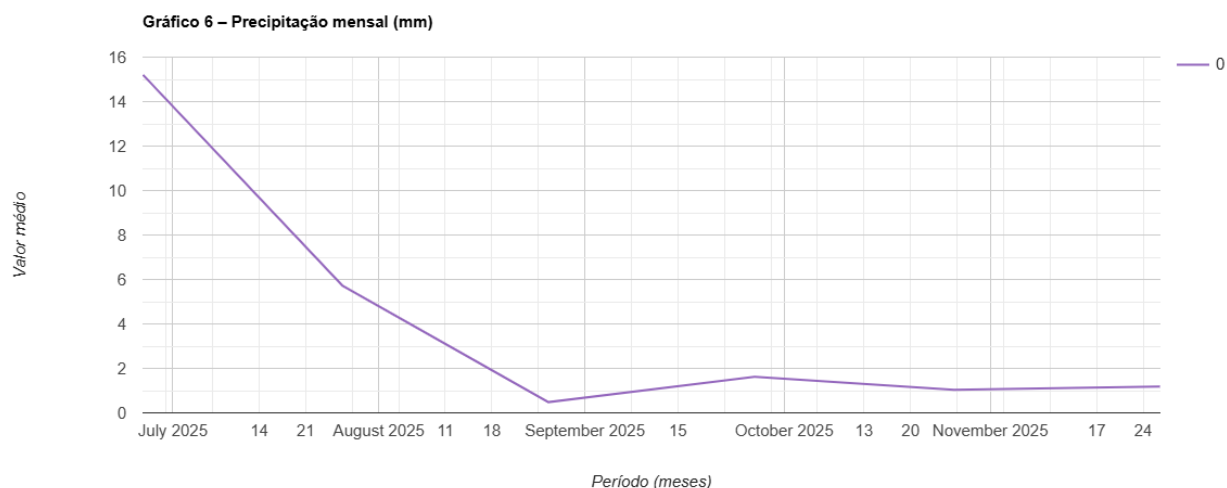


Fonte: Google Earth Engine, 2025

5.1.4 Precipitação e Planejamento Hídrico

O gráfico de precipitação (dataset CHIRPS) confirmou a ausência de chuvas (0 mm) entre agosto e outubro. Para a gestão da Bacia do Vale do Açu, este é o indicador de "alerta vermelho". A ausência de precipitação significa que toda a água consumida na região provém exclusivamente dos estoques superficiais e subterrâneos. O monitoramento contínuo dessa variável é fundamental para determinar o início e o fim dos períodos de racionamento ou de restrição de uso para setores não prioritários.

Gráfico 5 – Precipitação Mensal



Fonte: Google Earth Engine, 2025

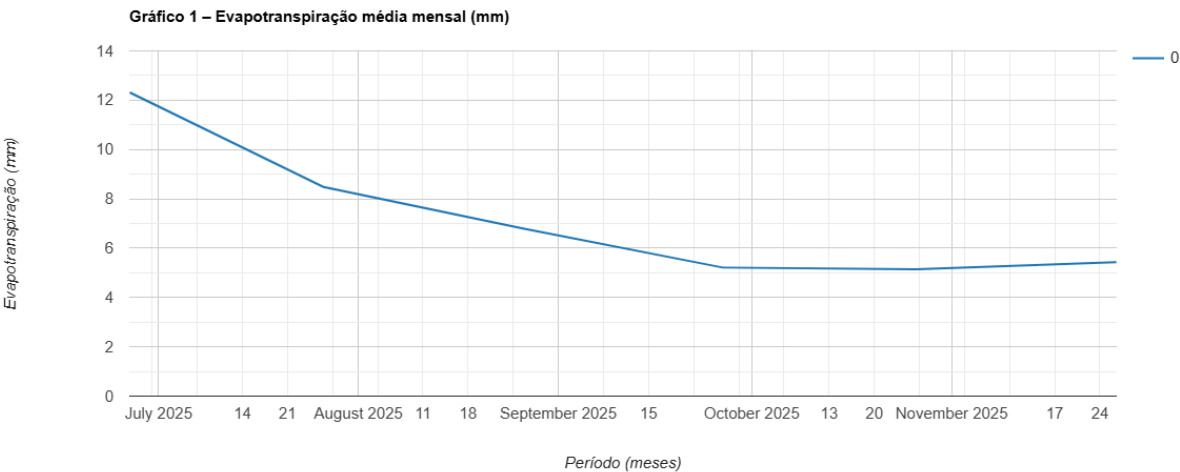
Para a agricultura, a precisão na medição da precipitação é fundamental para o

planejamento de irrigação. A ausência de chuvas (0 mm) indica a necessidade de irrigação suplementar total, enquanto a ocorrência de eventos pluviométricos, mesmo que pequenos, pode justificar a redução da lâmina de irrigação. O monitoramento contínuo da precipitação também impacta a gestão da recarga hídrica de reservatórios e o planejamento das operações de campo, como preparo de solo e colheita.

5.1.5 Evapotranspiração e a Comparação Histórica

A análise da Evapotranspiração (ET) média mensal, extraída do produto MODIS MOD16A2, mostrou uma variação de 14 mm para níveis inferiores ao longo do semestre. Como variável de "saída" do sistema, a ET é o principal dado para fechar a equação do balanço hídrico.

Gráfico 6 - Evapotranspiração



Fonte: Google Earth Engine, 2025

A grande inovação do sistema para a gestão pública reside na comparação da ET recente com a média histórica de 30 anos. A métrica de probabilidade relativa indica se o consumo de água na bacia está dentro dos padrões normais ou se há uma anomalia.

6 CONCLUSÃO

A principal contribuição deste trabalho materializa-se no desenvolvimento de uma plataforma computacional robusta e unificada para o suporte à decisão na Bacia Hidrográfica do Vale do Açu. A ferramenta, estruturada sobre a arquitetura de processamento em nuvem do Google Earth Engine (GEE), supera o desafio da dispersão de dados ao automatizar a coleta e integração de três grandes inventários globais: o ERA5-Land (para variáveis térmicas), o CHIRPS Daily (para precipitação) e o MODIS (para evapotranspiração). Essa integração permite converter terabytes de dados brutos em um painel de monitoramento, focado especificamente no polígono entre Itajá e Pendências.

Do ponto de vista técnico e funcional, o maior ineditismo da plataforma reside na implementação do algoritmo de "Probabilidade Relativa da Evapotranspiração". Esta funcionalidade transcende a simples visualização de dados ao processar, em tempo real, a comparação entre a demanda hídrica atual (dos últimos 16 dias) e a média climatológica dos últimos 30 anos. Ao traduzir essa análise estatística em indicadores visuais intuitivos, que sinalizam anomalias de consumo acima ou abaixo da média histórica, o sistema entrega aos gestores públicos uma métrica de "saúde hídrica" da bacia.

A arquitetura da solução foi desenhada para garantir acessibilidade e democratização da informação. A exportação dos dados processados para um ambiente web (Google Sites) e a geração automática de gráficos de séries temporais eliminam a barreira da necessidade de hardware de alto desempenho por parte do usuário final. O sistema demonstra ser capaz de detectar fenômenos críticos, como a supressão de chuvas no segundo semestre e picos de temperatura de superfície de 33,5°C, validando sua eficácia como ferramenta de diagnóstico contínuo.

Em suma, a plataforma entrega uma solução tecnológica de baixo custo, alta escalabilidade e independência de infraestrutura física local. Ela preenche a lacuna de ferramentas de monitoramento específicas para a gestão pública na região, oferecendo um meio prático para que a administração dos recursos hídricos e a gestão agrícola migrem de um modelo reativo para um modelo preventivo, baseado em dados de sensoriamento remoto atualizados e confiáveis.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES EXPORTADORES DE FRUTAS (ABRAFRUTAS). Frutos da irrigação: os municípios da fruticultura do RN respondem por parcela significativa da produção brasileira. Disponível em:

<<https://abrafrutas.org/frutos-da-irrigacao-os-ms-da-fruticultura-do-rn-respondem-por-quase--d-a-producao-brasileira/>>. Acesso em: dez. 2025.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO (UFERSA). Pesquisa sobre demanda hidrológica no Vale do Açu utilizando Google Earth Engine. Pesquisa realizada pelo Prof. Dr. Osvaldo Nogueira de Sousa Neto. Mossoró: UFERSA, Disponível em:

<<https://www.ufersa.edu.br/>> .Acesso em: dez. 2025.

AMANI, Meisam et al. Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, v. 13, p. 5326-5350, 2020.

ALVES, V. E. L. A modernização da fruticultura irrigada e seus impactos socioeconômicos e ambientais no Vale do Açu/RN. Revista GeoInterações, Mossoró. Disponível em:

<<https://periodicos.apps.uern.br/index.php/RGI/article/view/>>. Acesso em: dez. 2025.

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Açudes do semiárido: saiba mais. Brasília/DF, Disponível em:

<<https://www.gov.br/ana/pt-br/sala-de-situacao/acudes-do-semiarido/acudes-do-semiarido-saiba-mais/>> . Acesso em: dez. 2025.

TROLEI, A. L. Os recursos hídricos do Rio Grande do Norte: uma análise da Bacia do Rio Piranhas-Açu. Confins. Disponível em: < <https://journals.openedition.org/confins/>> .Acesso em: dez. 2025.

GOOGLE. Earth Engine Data Catalog (EEDC). Disponível em:

< <https://developers.google.com/earth-engine/datasets?hl=pt-br>> . Acesso em: 26 Nov. 2025.

DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DO BAIXO AÇU (DIBA). Projeto de irrigação Osvaldo Amorim. Disponível em: <<https://diba.org.br/>> .Acesso em: dez. 2025.

DINIZ, J. A. O. Recursos hídricos subterrâneos: levantamento do Aquífero Açu. Rio de Janeiro: Serviço Geológico do Brasil (CPRM),
Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/aquifero_acu.pdf> . Acesso em: dez. 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). A questão da água no Nordeste. Brasília, DF. Disponível em:
< <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/agua-nordeste.pdf>>
Acesso em: dez. 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Sistema de Monitoramento Agrometeorológico – Agritempo. Brasília, DF.
Disponível em:< <https://www.agritempo.gov.br/>> . Acesso em: dez. 2025.

MUÑOZ-SABATER, Joaquín et al. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, v. 13, n. 9, p. 4349-4383, 2021.

FUNK, Chris et al. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, v. 2, n. 1, p. 1-21, 2015.
(Referência oficial do CHIRPS).

GORELICK, Noel et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, v. 202, p. 18-27, 2017.

SILVA JUNIOR, Umberto Pereira da; SOUSA NETO, Osvaldo Nogueira de. Potencialidades do Google Earth Engine para estudos ambientais, 2024. Disponível em:
<<https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/9078237b-549a-4373-bd55-f9ba37e6bec8/content>>.

OPENAI. *ChatGPT*. Disponível em: < <https://chat.openai.com/> >. Acesso em: 7 Nov. 2025.

ADUERN. ARTIGO: Vale do Açu: uma região estratégica para a economia potiguar. Disponível em:

<<https://aduern.org.br/artigo-vale-do-acu-uma-regiao-estrategica-para-a-economia-potiguar/>>.

AGRITEMPO. Sistema de Monitoramento Agrometeorológico. Disponível em: <<https://www.agritempo.gov.br/br/>>.

ANDRADE, D. C. de; PAIVA, E. M. C. de; PEREIRA, R. E. O. C. Desafios e oportunidades do empreendedorismo feminino na fruticultura irrigada do Vale do Açu. Disponível em:

<<https://periodicos.apps.uern.br/index.php/RGI/article/view/4977>>.

CONSELHO REGIONAL DE ECONOMIA DO RIO GRANDE DO NORTE (CORECON-RN). A modernização da fruticultura irrigada e seus impactos socioeconômicos disponível em:

<<https://www.corecon-rn.org.br/2018/06/04/a-modernizacao-da-fruticultura-irrigada-e-seus-impactos-socioeconomicos-e-ambientais-no-vale-do-acu/>>.

GOOGLE. *Google Earth Engine*. Disponível em: < <https://earthengine.google.com/> >. Acesso em: 5 Nov. 2025.

SANTOS, Leonardo Laipelt dos. GEESEBAL: uma ferramenta Google Earth Engine para estimativa de séries temporais de evapotranspiração. 2020. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

MENDES, Luiz Pedro de Oliveira *et al.* Análise da precipitação pluviométrica por meio de dados CHIRPS e Google Earth Engine. *Caminhos de Geografia*, Uberlândia, v. 25, n. 101, p. 174-192.

RIGHI, Eléia *et al.* Google Earth Engine: uma análise bibliométrica da produção científica. Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, n. 43, p. 62-77, 2024.

CONCEIÇÃO, Marco Antônio Fonseca; ALVES, Maria Emília Borges. A evapotranspiração e a determinação das necessidades hídricas das culturas. Wikirriga, 24 fev. 2025.

SANTINO, Brenda de Souza; CHAVES, Joselisa Maria. Utilização do Google Earth Engine como ferramenta para avaliação da expansão da mancha urbana no município de Feira de Santana-BA. Revista de Geociências do Nordeste, [S. l.], v. 7, n. 2, p. 245-252, 2021.