







Edu-Clima: uma ferramenta didática para simulação e modelagem do clima urbano

Henrique Nicolau Grillaud MARANHOLI ¹, Flávia Maria de Moura SANTOS ^{1,2},
Victor Hugo MARANHOLI ³, Wennder Tharso Oliveira da Silva MARTINS ¹,
Wellington Fava ROQUE-MARANHOLI ^{*4}

¹ Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, Brasil.
² Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, Brasil.
³ Sistemas de Informação, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, Brasil.
⁴ Faculdade de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, Brasil.
*Email: henrique.maranholi@edu.mt.gov.br; wellington.fava23@gmail.com

Submetido em: 05/02/2026; Aceito em: 20/03/2026; Publicado em: 15/04/2026.

RESUMO: Este artigo apresenta o desenvolvimento e a validação do Edu-Clima, uma aplicação educacional de código aberto para simular a temperatura da superfície urbana. O objetivo deste estudo foi desenvolver e validar um aplicativo para simular a temperatura da superfície urbana, com fins didáticos, comparando seus resultados aos obtidos pelo software ENVI-met, a fim de avaliar sua confiabilidade para uso no ensino de climatologia urbana. O Edu-Clima foi desenvolvido em *Python* e utiliza bibliotecas como *Streamlit*, *Pandas*, *Matplotlib*, *Seaborn* e *Plotly* para criar uma interface interativa e visualmente instrutiva. A metodologia envolveu a comparação entre os resultados do Edu-Clima e do ENVI-met, utilizando 12 cenários distintos, cada um com 23 simulações, totalizando 276. Os cenários consideraram variáveis como temperatura da superfície, índice de área foliar (alta, média ou baixa), cobertura do solo (50% de asfalto ou de concreto) e tipo de solo (exposto ou vegetado). Os resultados revelaram que, embora o ENVI-met apresente temperaturas mais altas de forma consistente, o Edu-Clima apresentou um padrão térmico mais regular. Embora as análises estatísticas tenham indicado uma diferença significativa entre as médias térmicas simuladas ($p < 0,05$), com o ENVI-met registrando valores superiores, ambas as ferramentas demonstraram tendências de comportamento semelhantes nos cenários propostos, o que valida o Edu-Clima para fins didáticos, em linha com o ODS 4 (Educação de Qualidade), que enfatiza a promoção de recursos educacionais inclusivos e acessíveis. No entanto, o Edu-Clima mostrou maior sensibilidade em cenários vegetados, indicando uma limitação na modelagem da evapotranspiração e do sombreamento, que são mais precisos no ENVI-met. Entre as perspectivas futuras, destacamos a importância de aprimorar a modelagem dos efeitos da vegetação, incluindo variáveis como a evapotranspiração, a umidade do solo e o sombreamento.

Palavras-chave: ciências ambientais; educação ambiental; simulação do clima urbano; ensino de climatologia.

Edu-Clima: a didactic tool for the simulation and modeling of urban climate

ABSTRACT: This article presents the development and validation of Edu-Clima, an open-source educational application for simulating urban surface temperature. The objective of this study was to develop and validate an urban surface temperature simulation application for educational purposes by comparing its results with those obtained via ENVI-met software and evaluating its reliability for use in teaching urban climatology. Edu-Clima was built in Python and uses libraries such as Streamlit, Pandas, Matplotlib, Seaborn, and Plotly to create an interactive and visually educational interface. The methodology involved comparing the results of Edu-Clima with those of ENVI-met, using 12 different scenarios, each with 23 simulations, totaling 276 simulations. The scenarios considered variables such as surface temperature, leaf area index (high, medium, low), ground cover (50% asphalt or concrete), and soil type (exposed or vegetated). The results revealed that although ENVI-met consistently presented higher temperatures, Edu-Clima followed a more regular thermal pattern. Although statistical analyses indicated a significant difference between the simulated thermal averages ($p < 0.05$), with ENVI-met registering higher values, both tools demonstrated similar behavioral trends in the proposed scenarios, validating Edu-Clima for educational purposes, in line with SDG 4 (Quality Education), which emphasizes the promotion of inclusive and accessible educational resources. However, Edu-Clima showed greater sensitivity in vegetated scenarios, indicating a limitation in evapotranspiration and shading modeling, which are more accurate in ENVI-met. As prospects, we highlight the importance of improving the modeling of vegetation effects, including variables such as evapotranspiration, soil moisture, and shading.

Keywords: environmental sciences; environmental education; urban climate simulation; climatology teaching.

1. INTRODUÇÃO

A crescente urbanização e os desafios ambientais associados ao adensamento das cidades têm intensificado o interesse por ferramentas que auxiliem na compreensão e na mitigação dos impactos do microclima urbano (TRANE et al., 2023). Entre os elementos mais relevantes nesse cenário, destacam-se a temperatura superficial, a cobertura vegetal e os tipos de material presentes no solo urbano, fatores intimamente ligados à qualidade de vida nas cidades e ao conforto térmico de seus habitantes (MAKVANDI et al., 2023).

No cenário contemporâneo, marcado por eventos climáticos extremos, ilhas de calor urbanas e pela crescente preocupação com a sustentabilidade ambiental, o entendimento da climatologia tornou-se uma competência essencial não apenas para especialistas, mas também para gestores públicos, educadores e cidadãos em geral (RIUTTANEN et al., 2021). A capacidade de interpretar e prever padrões microclimáticos é fundamental para o planejamento urbano resiliente e para a tomada de decisões mais conscientes (MARANHOLI; SANTOS, 2024).

Nesse contexto, os simuladores climáticos computacionais têm se consolidado como instrumentos essenciais para a análise e a previsão de variáveis ambientais (CAMPS-VALLS et al., 2025). Contudo, embora plataformas robustas como o ENVI-met ofereçam alta precisão e detalhamento, sua complexidade e custo podem limitar seu uso em contextos educacionais ou de planejamento preliminar (PACIFICI; NIETO-TOLOSA, 2021). Diante disso, a pesquisa propôs o desenvolvimento de um aplicativo próprio, com interface acessível e propósito didático, para simular a temperatura superficial em diferentes cenários urbanos.

O desenvolvimento de aplicativos com código aberto, de fácil entendimento e manuseio, é fundamental para democratizar o acesso a essas ferramentas (PACIFICI; NIETO-TOLOSA, 2021; KIM; KWON, 2025). Tais aplicações, ao serem disponibilizadas sob licença aberta, oferecem a oportunidade de adaptação e personalização, favorecendo seu uso não apenas por profissionais, mas também por estudantes e educadores em busca de ferramentas de aprendizado acessíveis (STREB, 2023).

Nesse sentido, o desenvolvimento do aplicativo Edu-Clima surge como uma ferramenta estratégica, ao possibilitar a simulação de diferentes condições climáticas urbanas de forma acessível, didática e interativa. Ao permitir que o usuário explore variáveis como temperatura superficial, cobertura vegetal e tipos de solo, o aplicativo não apenas facilita o aprendizado de conceitos complexos, como por exemplo a percepção térmica de cada indivíduo e a alteração do albedo, em diferentes configurações ambientais, mas também promove a sensibilização sobre os efeitos das escolhas urbanas no ambiente térmico local, contribuindo para uma formação cidadã mais crítica e engajada com as questões climáticas e ambientais (LOZANO-DÍAZ; FERNÁNDEZ-PRADOS, 2020; KUROKAWA et al., 2023).

Esse caráter pedagógico conecta-se diretamente ao ODS 4 – Educação de Qualidade, uma vez que o Edu-Clima se apresenta como um recurso inovador para ampliar o acesso

a práticas educacionais inclusivas e equitativas. Ao transformar dados técnicos em experiências interativas de fácil compreensão, o aplicativo fortalece o ensino de climatologia urbana, estimula a aprendizagem ativa e promove oportunidades de formação ao longo da vida, tanto em ambientes escolares quanto em espaços de educação não formal. Assim, o projeto contribui para a construção de competências essenciais para enfrentar os desafios da sustentabilidade e da resiliência urbana.

Neste contexto, o presente estudo investiga a viabilidade do Edu-Clima como ferramenta didática confiável para simular a temperatura superficial urbana. Nossa hipótese é que não há diferença estatisticamente significativa entre os resultados de temperatura superficial simulados pelo aplicativo Edu-Clima e os obtidos pelo *software* ENVI-met.

Como premissa procedimental, buscamos avaliar sua confiabilidade por meio de métodos estatísticos e de análises multivariadas. A investigação visou, assim, contribuir tanto para o aprimoramento das metodologias de ensino em climatologia urbana quanto para a democratização de ferramentas digitais voltadas à sustentabilidade das cidades.

Nesse panorama, a integração de tecnologias computacionais e recursos digitais no processo de ensino-aprendizagem de Geografia e Climatologia transcende a mera modernização instrumental, configurando-se como uma estratégia de mediação do conhecimento. Conforme postulam Vieira; Gomes (2025), o emprego de *softwares* de simulação no contexto educacional atua como um recurso didático inovador, permitindo que o estudante construa o saber de forma interativa ao interpretar dinâmicas espaciais complexas por meio de ambientes digitais controlados.

Ademais, o uso de ferramentas que possibilitam a visualização de cenários e a manipulação de variáveis ambientais é fundamental para fomentar a literacia climática e o engajamento discente em questões de sustentabilidade, transformando-os em agentes ativos na interpretação dos fenômenos urbanos (ANDERSON, 2024). Sob essa ótica, Fonseca (2022) ressalta que o uso de materiais didáticos estruturados para a análise do microclima é determinante para mitigar o distanciamento entre as abstrações teóricas e a percepção sensorial do cotidiano, tornando os processos atmosféricos conceitos tangíveis e inteligíveis no âmbito acadêmico.

Portanto, o nosso objetivo foi desenvolver um aplicativo de simulação de temperatura superficial urbana de código aberto e validá-lo por meio da comparação de seus resultados com os obtidos no *software* ENVI-met, avaliando sua confiabilidade para aplicação no ensino de climatologia urbana.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi desenvolvido um aplicativo para simular diferentes cenários com variações de temperatura, de cobertura do solo e de área foliar. Com o intuito de obter maior confiabilidade nos resultados, cenários foram criados com o ENVI-met¹, um *software* de simulação de microclima tridimensional utilizado para modelar ambientes urbanos e avaliar o impacto de fatores como morfologia, vegetação e materiais de construção no clima

¹ É possível obter mais informações e baixar a versão gratuita deste software na página oficial: <https://envi-met.com/>.

local. Essa abordagem visou garantir a maior similaridade possível aos cenários apresentados no aplicativo desenvolvido.

2.1. Desenvolvimento do aplicativo

O desenvolvimento do aplicativo foi realizado em *Python*², com o apoio de diversas bibliotecas e tecnologias complementares (WASKOM, 2021). A modelagem matemática do Edu-Clima fundamenta-se num algoritmo de balanço térmico que estima a temperatura superficial (T_s) a partir da temperatura do ar ambiente (T_a) acrescida de uma variante de correção (ΔT), conforme a (equação 1):

$$T_s = T_a + \Delta T \quad (01)$$

em que: ΔT representa o ajuste térmico resultante da interação entre os materiais de revestimento e os elementos bióticos presentes no cenário. Para o cálculo de ΔT , o algoritmo processa de forma integrada os fatores de aquecimento urbano (δ) e o potencial de atenuação térmica derivado da vegetação, conforme a expressão consolidada (equação 2):

$$\Delta T = \delta - IAF \quad (02)$$

Nesse arcabouço, a parametrização dos fatores de aquecimento (δ) foi estabelecida com base em coeficientes térmicos derivados empiricamente para diferentes materiais de superfície:

- Asfalto: +5 °C;
- Concreto: +3 °C;
- Solo exposto: +1 °C;
- Solo com grama: -1 °C.

Simultaneamente, o resfriamento microclimático é modelado por meio do Índice de Área Foliar (IAF), que atua como variável mitigadora da carga térmica superficial. Para a calibração do algoritmo, estabeleceram-se coeficientes de atenuação térmica estratificados de acordo com a densidade foliar, definidos conforme a seguinte parametrização:

- IAF Elevado: redução de 5 °C;
- IAF Intermediário: redução de 3 °C;
- IAF Reduzido: redução de 2 °C.

Ao traduzir dinâmicas multivariadas de balanço de energia em resultados interpretáveis diretamente, a ferramenta desempenha um papel estratégico na mediação do conhecimento, facilitando a compreensão de fenômenos microclimáticos por meio de simulações parametrizadas.

2.2. Funcionamento do Programa

O programa utiliza a biblioteca *Streamlit*³ para a criação de uma interface web interativa, fundamentando-se em diretrizes de Engenharia de *Software* voltadas à modularidade e à separação de responsabilidades (*Separation of Concerns*). A adoção dessa arquitetura, baseada em tecnologias de código aberto e metodologias de prototipagem rápida, assegura a consistência técnica e a escalabilidade da ferramenta para fins pedagógicos. Sob essa estrutura, o fluxo de funcionamento do programa pode ser descrito nas seguintes etapas:

- Coleta de Dados: O programa consulta a API *OpenWeather*⁴ para obter dados de temperatura para uma coordenada específica;
- Leitura de Dados Locais: Leitura de dados de temperatura registrados localmente a partir de arquivos CSV utilizando *Pandas*⁵;
- Tratamento dos Dados: Os dados são limpos e processados para remover outliers e preencher valores faltantes;
- Comparação e Análise: Os dados da API e os dados locais de temperatura, área foliar e tipo da cobertura de solo (asfalto ou concreto) e condição do solo (exposto ou vegetado), são comparados e analisados;
- Visualização: Os resultados são visualizados em gráficos interativos utilizando *Matplotlib*⁶, *Seaborn*⁷ e *Plotly*. *Streamlit*⁸, o que facilita a visualização na interface web.

2.3. Código-Fonte

O código-fonte⁹ foi organizado em módulos para facilitar a manutenção e a escalabilidade do programa, adotando uma Arquitetura Orientada a Serviços (SOA) para a integração de dados meteorológicos globais. Pautado pelos preceitos da Ciência Aberta, o desenvolvimento utilizou exclusivamente tecnologias de código aberto (como *Python*, *Pandas* e a API *OpenWeather*), garantindo a auditabilidade e a reprodutibilidade. Os principais componentes da arquitetura, referenciados no sistema como “(aspas)”, incluem:

- início.py: Arquivo principal que inicializa a aplicação do *Streamlit* e gerencia a interface de usuário.
- A renderização da tela utiliza o recurso “columns” da biblioteca *Streamlit* para dividir a interface em três colunas.
- A “coluna_ centro” renderiza o “st.components.v1.html” – o *Streamlit* utiliza a função “components” para transformar o retorno da função “mapa_de_calor” em um html – formato de arquivo compreendido pelo navegador.
- A “right” renderizada após o chamado da “center.column”, apresentada acima, contém a função st.dataframe (método para informar ao *Streamlit* que ali será renderizado um Dataframe).

² Linguagem de programação interpretada, de alto nível e com tipagem dinâmica. É amplamente utilizada devido à sua simplicidade e robustez, o que facilita o desenvolvimento rápido de aplicações. Sua vasta coleção de bibliotecas torna-o ideal para projetos científicos e de análise de dados. Licença da Python Software Foundation (PSF), permissiva e permitindo uso comercial.

³ Bibliotecas em Python que permitem a criação de aplicações web interativas de forma rápida e fácil. É particularmente útil para a visualização de dados e de dashboards, tornando-se uma escolha popular entre cientistas de dados. A licença Apache 2.0 é do tipo permissiva que permite o uso, a modificação e a distribuição.

⁴ Plataforma que fornece acesso a dados climáticos globais, incluindo previsões de temperatura, umidade, precipitação e muito mais. A API é frequentemente utilizada em aplicativos que necessitam de dados climáticos

precisos e atualizados. Disponível em diferentes planos de assinatura, incluindo opções gratuitas e pagas.

⁵ Biblioteca de *software* em *Python* para manipulação e análise de dados. Ela oferece estruturas de dados e operações para manipular tabelas numéricas e séries temporais.

⁶ Biblioteca de plotagem 2D em *Python* que gera figuras de alta qualidade em uma variedade de formatos e ambientes.

⁷ Baseada no *Matplotlib*, a *Seaborn* oferece uma interface de alto nível para a criação de gráficos estatísticos atraentes.

⁸ Biblioteca interativa de gráficos que permite a criação de visualizações complexas com facilidades de zoom, pan e hover.

⁹ Disponível em: https://github.com/projetodoutoradofmtambiental/simulador_climatico_doutorado_maranholi

- e) Ao lado da coluna anterior existe a “left”, divisão de tela que complementa a direita anterior renderizando o gráfico de barras, chamado no gráfico pela função “st.plotly_chart(fig)”, aonde: fig: contém a “figura” do gráfico renderizado; St.plotly_chart é a função *streamlit* que renderiza a figura do gráfico dentro da divisão esquerda da tela.
- f) sidebar.py: arquivo que contém as funções responsáveis pela interação com a API do OpenWeather, pela geração do mapa de calor e pela renderização do menu lateral da ferramenta.
- g) Obter_temperatura_openweathermap: função que recebe os parâmetros latitude e longitude para consultar a API da OpenWeather, com a chave obtida diretamente no site deles, contida no objeto “api_key”, e retorna as informações climáticas relevantes ao escopo do projeto.
- h) A API retorna um *Json* repleto de informações, a partir do qual são extraídas as que nos interessam. Esta funcionalidade está localizada no “try except” da função.
- i) Folium: biblioteca para renderizar mapas geográficos. No código, ela recebeu o alias (apelido) “fo”.
- j) fo.Map – recebe o parâmetro do tipo de linhas a serem renderizadas no mapa e o zoom_start, com valor 13, indicando que o mapa deve renderizar as coordenadas no nível de zoom adequado à pesquisa.
- k) fo.CircleMarker – renderiza a borda dos círculos que representam a temperatura da região. A renderização de todos os círculos que aparecem na ferramenta é realizada no loop “for ponto in pontos”, no qual são consultadas as coordenadas obtidas na API.
- l) Sidebar_dados_pesquisa – esta função renderiza, em um menu lateral, todos os campos em que o usuário insere informações sobre a coleta de temperatura. Retorna, quando invocada pelo arquivo main.py, a latitude_pesquisa, longitude_pesquisa, temperatura_sem_foliar. É composta, entre outras, pelas funções:
- Latitude_pesquisa: função que renderiza o campo de inserção de latitude no menu lateral. Caso o usuário não insira um valor, ele considerará o padrão -15.612642354149061 para repassagem de informação à API;
 - Longitude_pesquisa: similar à função anterior, tendo como padrão o valor -56.038829296302545, caso não seja inserida informação pelo usuário;
 - Temperatura_pesquisa: renderiza o campo de inserção de temperatura coletada pelo usuário. Como padrão, caso o campo não seja preenchido, ele conterá o valor obtido pelas coordenadas geográficas acima;
 - Vegetação_selecionada: renderiza as opções de como um menu ‘alto’, ‘médio’, ‘baixo’, ‘manual’ para seleção do usuário (nesta hipótese, um campo de inserção de informação será disposto ao usuário);
 - Percentual_cobertura_solo: renderiza as opções ‘asfalto’, ‘concreto’ e ‘manual’ para seleção pelo usuário. O comportamento da seleção ‘manual’ é o mesmo que o da anterior.
- m) dataframe.py: Este arquivo contém as funções “dataframe” e “plotar_grafico”, que retornam “df” e “fig” respectivamente.
- n) dataframe: recebe os argumentos “latitude_pesquisa”, “longitude_pesquisa”, “temperatura_pesquisa” e “regiões” para renderizar o *dataframe* exibido na

ferramenta. A função utiliza *Pandas* para realizar as operações.

- o) plotar_grafico: recebe “df” como argumento e utiliza a biblioteca *Plotly*, por meio do módulo *Express*, para criar o gráfico de barras exibido na ferramenta.
- p) page_especs.py: arquivo que contém a função page_config.
- q) page_config: utiliza o *Streamlit*, através do alias “st”, do método “set_page_config” para informar ao navegador detalhes da interface, sendo eles: page_title; page_icon; layout.

2.4. Parâmetros para produção de cenários: ENVI-met x Edu-Clima

A configuração das simulações no *software* ENVI-met, que serviu como base de comparação (*baseline*), fundamentou-se em dados climáticos reais coletados *in situ* em 08 de maio de 2024. As medições foram realizadas no bairro Recanto dos Pássaros, em Cuiabá-MT, nas coordenadas geográficas de latitude: -15.6126423541 49061 e longitude: -56.038829296302545.

Para garantir a fidedignidade do cenário real, foram realizadas medições de temperatura do ar em três períodos distintos: manhã (08h: 35,6 °C), tarde (14h: 40,4 °C) e noite (20h: 30,2 °C). Esses valores foram inseridos como parâmetros de entrada (fator de forçante térmica) no ENVI-met para a geração do cenário de referência. Os resultados médios horários processados pelo *software* para este cenário real estão sistematizados na Tabela 1 e representam o comportamento térmico padrão do local de estudo antes da aplicação das variantes de cobertura de solo e de vegetação detalhadas nas etapas subsequentes.

Tabela 1. Horários e valores do cenário real utilizados nas simulações no aplicativo Edu-Clima.

Table 1. Schedules and values from the real-world scenario were used for simulations in the Edu-Clima app.

00:00 horas - 20,98°C	13:00 horas - 26,03°C
02:00 horas - 20,03°C	14:00 horas - 26,25°C
03:00 horas - 19,28°C	15:00 horas - 26,48°C
04:00 horas - 18,71°C	16:00 horas - 26,35°C
05:00 horas - 18,09°C	17:00 horas - 25,19°C
06:00 horas - 18,33°C	18:00 horas - 24,84°C
07:00 horas - 19,01°C	19:00 horas - 24,25°C
08:00 horas - 20,47°C	20:00 horas - 23,73°C
09:00 horas - 22,20°C	21:00 horas - 23,05°C
10:00 horas - 23,60°C	22:00 horas - 22,44°C
11:00 horas - 24,66°C	23:00 horas - 21,82°C
12:00 horas - 24,96°C	

Para o índice de área foliar (IAF) foram arbitrados 3 diferentes níveis, sendo:

- IAF alto, em que foi atribuída uma estimativa de valor de uma cobertura de copa maior que 90%;
- IAF médio, onde foi atribuída uma estimativa de valor de cobertura de copa de cerca de 50%;
- IAF baixo, com cobertura de copa inferior a 15%.

Na camada de cobertura do solo, foram considerados dois tipos de material: concreto e asfalto. Para estes materiais, embora tanto o ENVI-met quanto o Edu-Clima permitam diferentes porcentagens, foi estabelecida uma cobertura de solo constante de 50%. No que tange ao tipo de solo utilizado

na produção dos cenários, foram definidos dois tipos: solo exposto, em que não há cobertura de material construtivo nem de material natural. O outro tipo de solo definido foi o

solo vegetado, no qual se considerou uma cobertura de grama natural. Os parâmetros podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros para a construção de cenários de simulação.

Table 2. Parameters for constructing simulation scenarios.

IAF ¹ – Alto Cobertura do solo – asfalto (50%) Tipo de solo – exposto	IAF – Médio Cobertura do solo – asfalto (50%) Tipo de solo – exposto	IAF – Baixo Cobertura do solo – asfalto (50%) Tipo de solo – exposto
IAF – Alto Cobertura do solo – concreto (50%) Tipo de solo – exposto	IAF – Médio Cobertura do solo – Concreto (50%) Tipo de solo – exposto	IAF – Baixo Cobertura do solo – Concreto (50%) Tipo de solo – exposto
IAF – Alto Cobertura do solo – asfalto (50%) Tipo de solo – Vegetado	IAF – Médio Cobertura do solo – asfalto (50%) Tipo de solo – Vegetado	IAF – Baixo Cobertura do solo – asfalto (50%) Tipo de solo – Vegetado
IAF – Alto Cobertura do solo – concreto (50%) Tipo de solo – Vegetado	IAF – Médio Cobertura do solo – Concreto (50%) Tipo de solo – Vegetado	IAF – Baixo Cobertura do solo – Concreto (50%) Tipo de solo – Vegetado

¹ IAF – Índice de Área Foliar

LAI – Leaf Area Index.

Finalmente, após a definição dos parâmetros e dos elementos constituintes dos cenários, foi estabelecido um total de 12 configurações. Para cada cenário, foram realizadas 23 simulações, totalizando 276. Esse conjunto foi inicialmente rodado no *software* ENVI-met, considerando o cenário real, e posteriormente reproduzido no Edu-Clima, resultando em mais 276 simulações.

Para fins de nomenclatura, cada cenário foi nomeado de acordo com suas características arbitrárias:

- AEB – Cobertura do solo asfáltica com superfície exposta e baixo IAF;
- AEM – Cobertura do solo asfáltica com superfície exposta e médio IAF;
- AEA – Cobertura do solo asfáltica com superfície exposta e alto IAF;
- AVB – Cobertura do solo asfáltica com superfície vegetada e baixo IAF;
- AVM – Cobertura superficial asfáltica com superfície vegetada e médio IAF;
- AVA – Cobertura superficial asfáltica com superfície vegetada com alto IAF;
- CEB – Cobertura do solo de concreto com superfície exposta e baixo IAF;
- CEM – Cobertura do solo de concreto com superfície exposta e médio IAF;
- CEA – Cobertura do solo de concreto com superfície exposta e alto IAF;
- CVB – Cobertura vegetal de concreto com superfície vegetada e baixo IAF;
- CVM – Cobertura vegetal de concreto com superfície vegetada e médio IAF;
- CVA – Cobertura de solo de concreto com superfície vegetada e alto IAF.

2.5. Exploração de dados e análise estatística

Para explorar os resultados, o desvio (°C) foi calculado como a diferença entre as temperaturas simuladas no ENVI-met e no Edu-Clima, a fim de identificar anomalias climatológicas. A variação de temperatura (%) entre os simuladores foi calculada como o desvio (°C) em relação à temperatura média dos simuladores (ALMAZROUI et al., 2021; TWARDOSZ et al., 2021).

Os dados foram analisados por cenário, comparando os modelos ENVI-met e Edu-Clima. Os pressupostos de normalidade dos resíduos (teste de Shapiro-Wilk) e de independência das observações (teste de Ljung-Box) não foram plenamente atendidos; assim, a comparação entre os modelos foi realizada pelo teste de Wilcoxon para amostras pareadas. O desempenho das simulações foi avaliado pelas métricas: erro médio absoluto (MAE), raiz do erro quadrático médio (RMSE), viés médio (MBE), índice de concordância de Willmott (d) e coeficiente de correlação de Pearson (r).

Adicionalmente, a regressão cúbica foi utilizada de forma descritiva para representar a variação horária da temperatura em cada cenário, e a significância do ajuste foi avaliada por meio de uma ANOVA da regressão. Para a interpretação dos resultados, o RMSE foi classificado como baixo, moderado ou alto erro; o MBE indicou a direção e a magnitude do viés (leve, moderada ou acentuada); o índice de Willmott foi interpretado como alto ($d \geq 0,66$), moderado ($0,50 \leq d < 0,66$) ou baixo ($d < 0,50$); e a correlação de Pearson foi classificada como forte, moderada, fraca ou muito fraca conforme a magnitude de r.

Para representar, em espaço bidimensional, a similaridade entre os perfis horários simulados pelos modelos ENVI-met e Edu-Clima nos diferentes cenários, foi realizada uma análise multivariada, com análise de componentes principais (PCoA) baseada em distâncias euclidianas, seguida de uma PERMANOVA. A elaboração dos gráficos foi realizada no Microsoft Excel, enquanto os cálculos estatísticos foram processados em Python, com apoio das bibliotecas NumPy e Matplotlib para análise numérica e visualização gráfica.

3. RESULTADOS

3.1. Edu-Clima

O resultado do processo de desenvolvimento da aplicação, chamada Edu-Clima (disponível em <https://simuladorclimaticodoutoradomaranholi.streamlit.app/>), consistiu na criação de uma aplicação funcional, prática, interativa e educacional, voltada a simular a temperatura superficial em diferentes cenários urbanos (Figura 1). O design foi concebido para ser simples e compreensível a qualquer tipo de usuário.

O objetivo central é transformar conteúdos técnicos e abstratos, como o comportamento térmico em áreas urbanas,

em uma experiência interativa e acessível, capaz de envolver alunos e educadores em diferentes níveis de ensino.

Ao contrário de simuladores robustos como o ENVI-met, cujo uso exige conhecimento técnico avançado e

infraestrutura computacional específica, o Edu-Clima foi projetado com base em três premissas principais: usabilidade simplificada, visualização didática e integração com dados abertos.

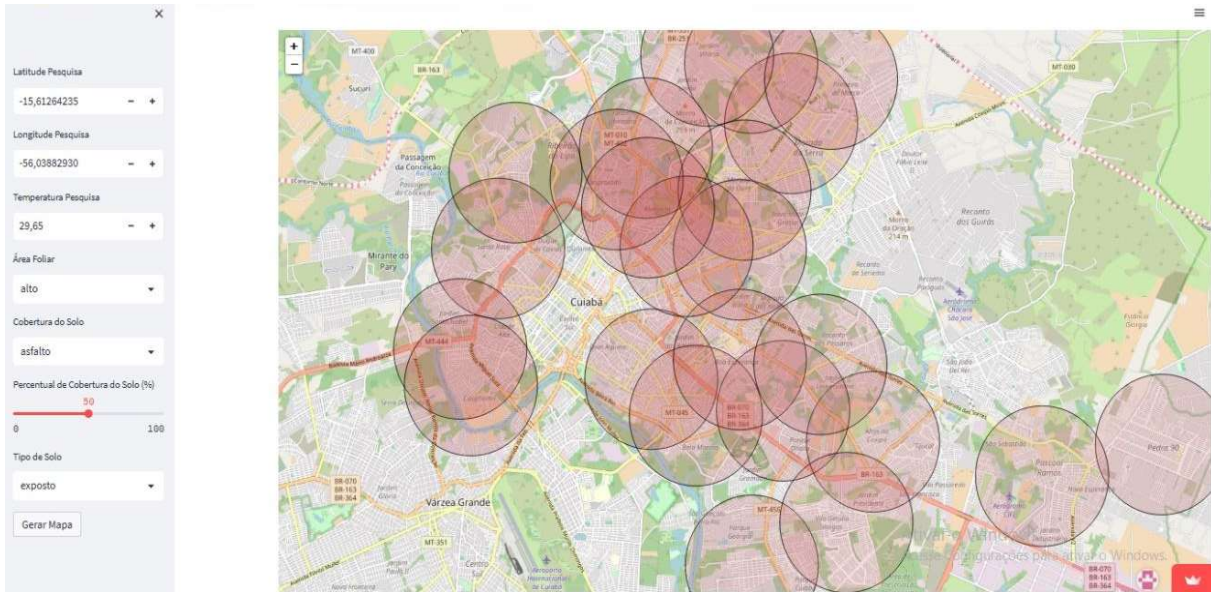


Figura 1. Interface do aplicativo Edu-Clima, com destaque para as áreas de influência dos parâmetros de entrada na estimativa da temperatura superficial.

Figure 1. Front-end of the Edu-Clima application, highlighting the areas of influence of the input parameters on the estimation of surface temperature.

A sensibilidade do Edu-Clima a pequenas variações em parâmetros de entrada, como tipo de cobertura, vegetação e horário do dia, permite que os usuários experimentem cenários e observem suas implicações térmicas, o que aumenta o engajamento em estratégias pedagógicas, como o ensino investigativo, a aprendizagem baseada em problemas (PBL) e a gamificação (ABDUL GHANI et al., 2022; LIU et al., 2023; ZHANG et al., 2025).

Outro recurso cuidadosamente projetado foi a apresentação de uma tabela com as temperaturas dos bairros de Cuiabá, Mato Grosso (Figura 2), na qual a pessoa que usa o aplicativo pode comparar as temperaturas de diferentes bairros da cidade. Embora tenhamos usado as coordenadas de Cuiabá, Brasil, como base para as simulações e validações do app, é importante notar que o sistema não se limita a essa cidade.

6



Figura 2. Vista da tabela de bairros da cidade de Cuiabá/MT, apresentada pelo aplicativo Edu-Clima.

Figure 2. View of the table of neighborhoods in the city of Cuiabá/MT, presented by the Edu-Clima application.

3.2. Verificação e Validação de Dados

O Edu-Clima foi desenvolvido com uma arquitetura flexível, permitindo que os usuários insiram quaisquer coordenadas geográficas para simular o microclima de

qualquer área urbana do mundo, desde que estejam dentro das métricas do clima local.

A interface baseada na biblioteca *Streamlit*, por exemplo, permite uma navegação fluida e intuitiva, enquanto o uso de

bibliotecas como *Folium*, *Plotly* e *Pandas* possibilita a criação de mapas interativos, gráficos dinâmicos e tabelas em tempo real, elementos que reforçam a compreensão visual e a interatividade com o fenômeno estudado. No cenário real, como esperado, a temperatura (°C) variou ao longo do tempo (horas) (Figura 3), com uma relação não linear entre as variáveis, representada por uma curva de tendência cúbica, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,8788. A análise de variância (ANOVA) da regressão foi significativa ($p < 0,05$), sugerindo que a variação de temperatura no cenário real foi influenciada pelo horário do dia.

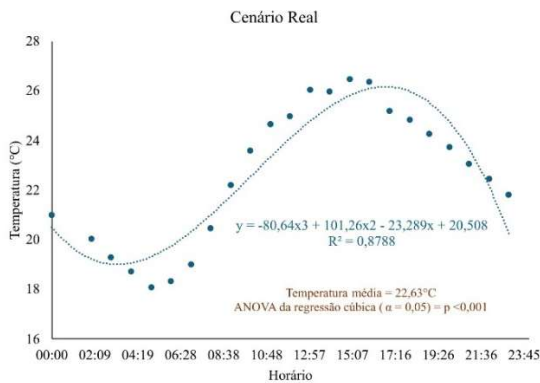


Figura 3. Distribuição temporal da temperatura em superfícies urbanas pavimentadas com baixo índice de área foliar, representada pelo cenário real.

Figure 3. Temporal distribution of temperature on paved urban surfaces with a low leaf area index, represented by the real scenario.

Conforme os dados simulados para o cenário real (Tabela 1), a temperatura máxima registrada durante o período de análise foi de 26,48 °C às 15h, enquanto a mínima atingiu 18,9 °C às 05h. A temperatura média predominante fixou-se em 22,63 °C, configurando o regime térmico de referência para o bairro Recanto dos Pássaros, em Cuiabá, no recorte temporal do estudo.

É relevante notar que esses valores, decorrentes do processamento do *software* ENVI-met a partir das forças térmicas coletadas *in situ*, refletem a estabilização das variáveis climáticas no modelo de referência, permitindo a correlação direta entre os dados observados e os cenários simulados subsequentes apresentados na Figura 4. Uma diferença visual clara entre os dois simuladores, ENVI-met e Edu-Clima, foi observada em todos os cenários estudados. As temperaturas simuladas pelo ENVI-Met foram mais altas do que as simuladas pelo Edu-Clima.

Na regressão linear com reta ajustada aplicada à representação dos valores de temperatura simulados pelos modelos ENVI-met e Edu-Clima em diferentes cenários, observou-se que o coeficiente de determinação (R^2) expressou de forma satisfatória a proporção da variabilidade dos modelos explicada pelas equações ajustadas. Em todos os cenários avaliados, verificou-se uma associação linear positiva entre os valores simulados pelos dois modelos, com comportamento semelhante na variação da temperatura ao longo da série analisada (Figura 4).

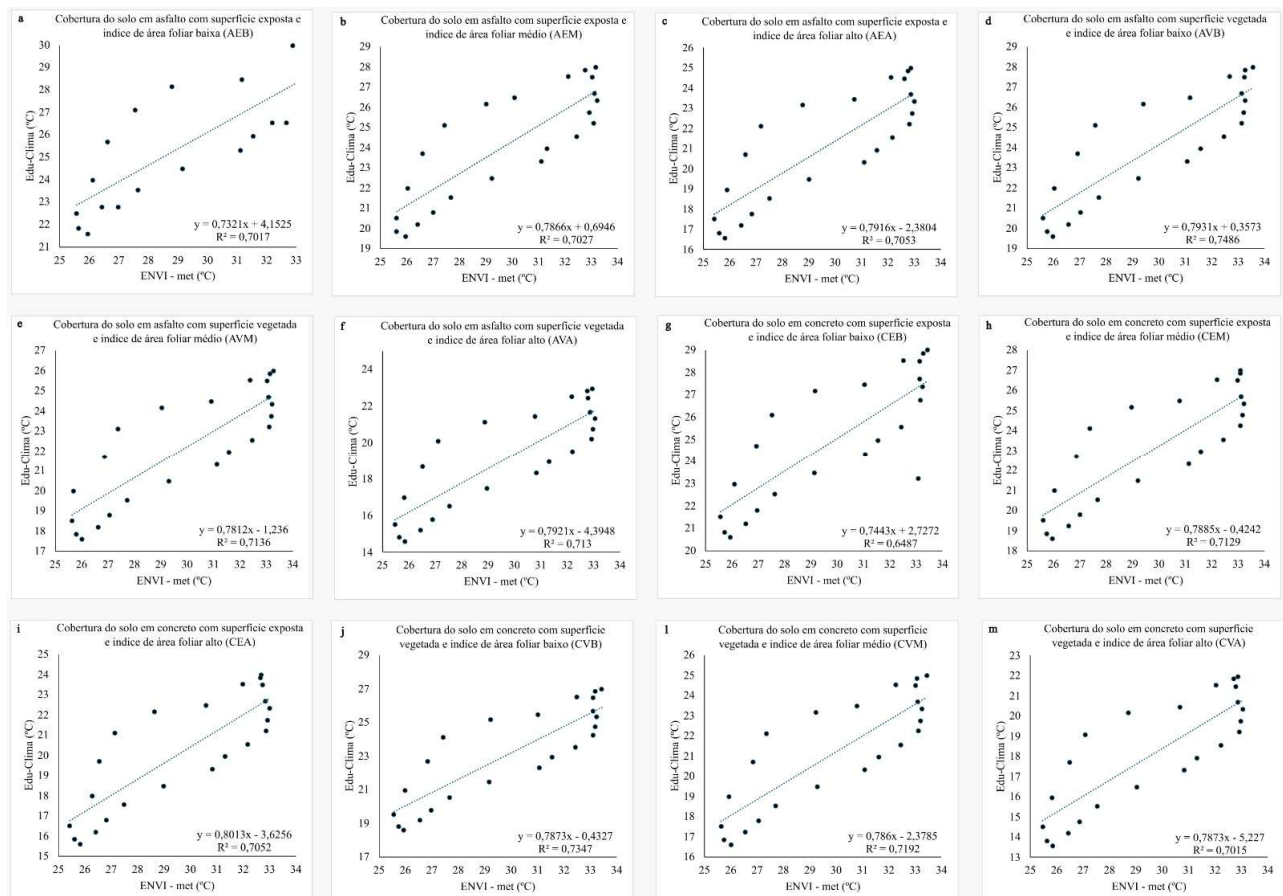


Figura 4. Relação entre os valores de temperatura simulados pelos modelos ENVI-met e Edu-Clima em diferentes cenários. Os pontos representam os pares de valores horários simulados. As linhas indicam o ajuste da regressão linear.

Figure 4. Relationship between temperature values simulated by the ENVI-met and Edu-Clima models in different scenarios. The points represent pairs of simulated hourly values. The lines indicate the linear regression fit.

Os valores de R^2 variaram entre 0,6487 e 0,7486, com ajuste de magnitude moderada a elevada. Os maiores valores foram observados nos cenários AVB ($R^2=0,7486$), CVB ($R^2=0,7347$) e AVM ($R^2=0,7136$), enquanto o menor foi observado no cenário CEB ($R^2=0,6487$). Também observamos que a distribuição dos pontos nos diagramas de dispersão evidenciou uma tendência de convergência entre os modelos em todos os cenários (Figura 4). Além disso, o aumento da temperatura estimado pelo ENVI-met foi acompanhado de um incremento correspondente nos valores do Edu-Clima, com coeficientes angulares entre 0,7321 e 0,8013.

A regressão cúbica foi o modelo que melhor se ajustou aos pontos para descrever a variação horária da temperatura simulada por cada modelo em cada cenário, com significância (ANOVA = $p < 0,05$), permitindo visualizar a tendência

temporal das séries, com alto coeficiente de determinação (R^2) para todos os modelos e cenários (Figura 5). Ao comparar as simulações realizadas com ENVI-met e Edu-Clima para os diferentes cenários, a linha de comportamento observada no Edu-Clima segue um padrão mais próximo de uma tendência, com menor variação de temperatura ao entardecer. Em contraste, no ENVI-met, em todos os cenários, a temperatura continuou a subir ao longo do dia ou permaneceu estável entre a tarde e a noite (entre 17h e 23h) (Figura 5).

O comportamento climático simulado pelo Edu-Clima para a cidade de Cuiabá, MT, reflete a tendência observada no cenário real. Como na cidade, a aplicação resulta nas temperaturas mais altas entre 10h e 14h, com uma redução gradual ao longo da noite.

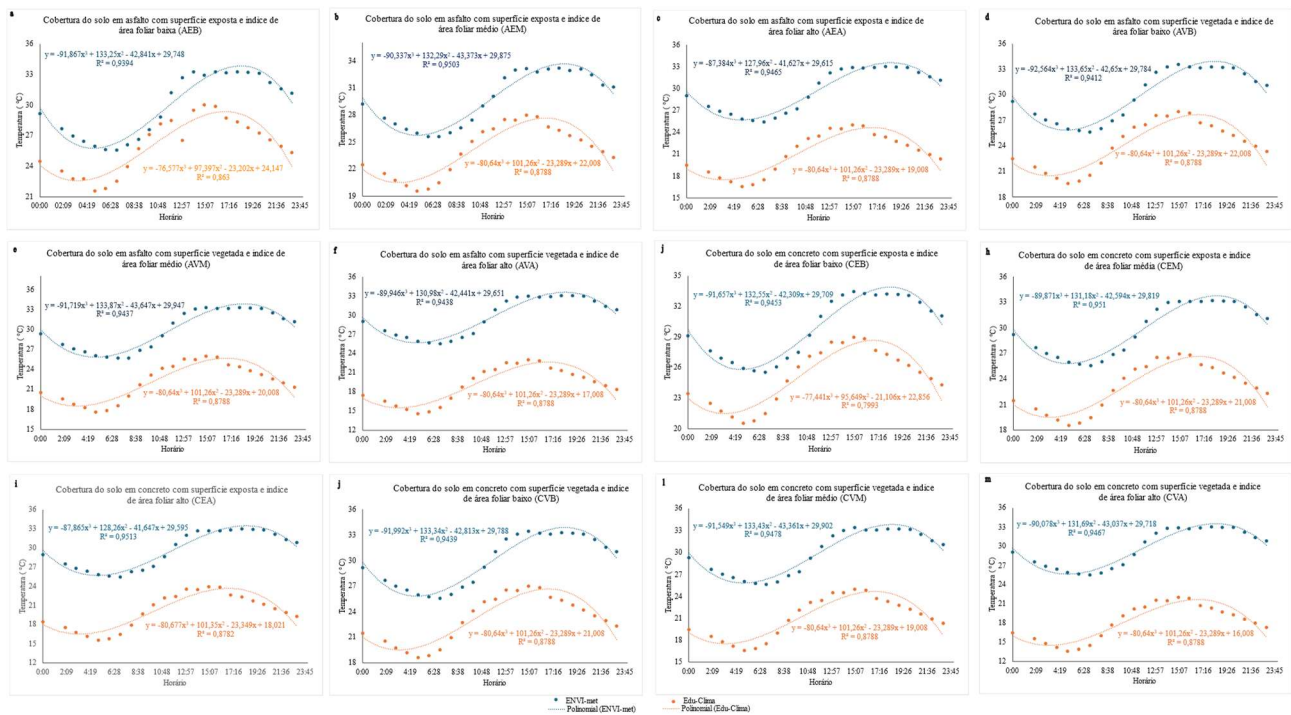


Figura 5. Comparação da variação horária do índice de calor simulada pelos modelos ENVI-met e Edu-Clima em diferentes cenários de cobertura do solo, condições de superfície e índice de área foliar. As linhas correspondem aos ajustes polinomiais dos dados, com indicação das equações e dos coeficientes de determinação (R^2) de cada modelo.

Figure 5. Comparison of hourly heat index variation simulated by the ENVI-met and Edu-Clima models in different scenarios of land cover, surface conditions, and leaf area index. The lines correspond to polynomial adjustments of the data, with indication of the equations and coefficients of determination (R^2) for each model.

A análise de regressão apresentada na Figura 5 revela que a temperatura varia ao longo do tempo em diferentes cenários de cobertura do solo, sejam eles asfalto com superfícies expostas, diferentes índices de área foliar ou mesmo asfalto com superfícies vegetadas. Esse padrão também se repete para coberturas de concreto, com ou sem superfícies expostas, em diferentes índices de área foliar. Isso pode ser visto na Figura 5, na qual a temperatura fornecida pelo ENVI-met na cobertura do solo asfáltica, com superfície exposta e baixo índice de área foliar (IAF), às 8h foi significativamente menor do que às 2h da manhã.

A análise dos dados de temperatura, por meio de uma curva de regressão de terceira ordem, revelou que o comportamento térmico na área de estudo não segue uma distribuição normal, indicando variabilidade complexa e não linear. Curiosamente, as observações obtidas em ambas as

aplicações, em cenários distintos, revelaram um padrão de comportamento semelhante na linha polinomial.

O coeficiente de determinação (R^2) é um indicador estatístico utilizado para avaliar a qualidade de um modelo de regressão. Ela mede a proporção de variação dos dados explicada pelo modelo. Os valores de R^2 obtidos em nossas equações indicam que o modelo é uma ferramenta confiável para descrever a tendência de temperatura dos dados.

A variação média nos cenários com superfícies expostas variou de 13,27% (AEB) a 37,49% (CEA) (Figuras 6 e 7). Nos cenários com superfícies vegetadas, a variação observada foi de 27,27% (AVB) a 47,11% (CVA). O coeficiente cumulativo de variação para os cenários com superfícies vegetadas e expostas permaneceu abaixo de 11%, indicando baixa dispersão relativa das temperaturas em ambos os cenários. Isso ocorre porque os coeficientes cumulativos de

variação estavam próximos dos coeficientes individuais de variação das temperaturas extraídas de cada simulador ao longo do tempo.

Considerando que os dados analisados correspondem a observações horárias sequenciais, optou-se por complementar a comparação da análise de regressão com testes de métricas de desempenho, como MAE, RMSE, índice de concordância de Willmott. E análise estatística com o teste de Wilcoxon pareado por cenário. Os valores de RMSE indicam variações no desempenho entre os cenários. Os menores valores foram observados em AEB (4,1817), CEB (5,2422), AEM (5,8875) e AVB (6,0321), indicando maior proximidade entre os modelos nesses cenários. Em contraste, os maiores erros ocorreram em CVA (11,6509), AVA (10,6864), CEA (9,6486) e CVM (8,9184), com desempenho menos satisfatório (Figuras 6 e 7).

Os valores de MBE foram negativos em todos os cenários, o que indica que o Edu-Clima subestimou sistematicamente os valores simulados pelo ENVI-met, com amplitude de erro menor nos cenários mais adversos. A progressão do viés, do leve ao acentuado, acompanhou, em grande parte, o aumento dos valores de RMSE. O índice de concordância de Willmott confirmou esse

comportamento, variando entre 0,3631 e 0,6720. O cenário AEB apresentou a maior concordância ($d = 0,6720$), sendo o único classificado como de alta concordância, enquanto AEM, AVB, CEB, CEM e CVB apresentaram concordância moderada. Já os cenários AEA, AVM, AVA, CEA, CVM e CVA foram classificados com baixa concordância, destacando-se o CVA como o pior ($d = 0,3631$) (Figuras 6 e 7).

A comparação entre os modelos ENVI-met e Edu-Clima, realizada pelo teste de Wilcoxon, revelou diferença estatisticamente significativa entre os modelos em todos os cenários avaliados ($p < 0,05$), com os valores simulados pelo Edu-Clima significativamente inferiores aos obtidos pelo ENVI-met, reforçando a diferença sistemática entre as estimativas dos dois modelos ao longo do tempo (Figuras 6 e 7).

Também calculamos a correlação linear de Pearson entre os modelos em todos os cenários, o que indica que o aumento da temperatura estimado entre ENVI-met e Edu-Clima foi forte e positivo, com valores de r entre 0,8377 e 0,8994, destacando-se o cenário AVB ($r=0,8994$) como o de maior associação. Apenas o cenário CEB apresentou correlação moderada ($r = 0,7765$; Figuras 6 e 7).

A -Asfalto com superfície exposta e baixo índice de área foliar (AEB)				
Métricas climatológicas e análises	ENVI-met	Edu-Clima	Desvio entre os modelos (°C)	Varição entre os modelos (%)
Temperatura Máxima (°C)	33,25	29,48	3,77	12,02
Temperatura Mediana (°C)	31,12	26,53	4,59	15,92
Temperatura Mínima (°C)	25,57	21,59	3,98	16,88
ANOVA da regressão cúbica (p- valor)	<0,001	<0,001	Análise Interpretativa	
Teste de Wilcoxon (p- valor) (N=23)	2,38E-07		Significativo ($\alpha = 0,05$)	
Raiz do Erro Quadrático médio (RMSE)	4,18		Erro baixo	
Viés médio (MBE)	-3,85		Subestimou (viés leve)	
Índice de Concordância de Willmott (d)	0,67		Concordância alta	
Correlação linear de Pearson (r)	0,84		Correlação forte positiva	

B -Cobertura do solo de concreto com superfície exposta e baixo índice de área foliar (CEB)				
Métricas climatológicas e análises	ENVI-met	Edu-Clima	Desvio entre os modelos (°C)	Varição entre os modelos (%)
Temperatura Máxima (°C)	33,44	28,98	4,46	14,29
Temperatura Mediana (°C)	31,04	24,94	6,10	21,79
Temperatura Mínima (°C)	25,56	20,59	4,97	21,54
ANOVA da regressão cúbica (p- valor)	<0,001	<0,001	Análise Interpretativa	
Teste de Wilcoxon (p- valor) (N=23)	0,00		Significativo ($\alpha = 0,05$)	
Raiz do Erro Quadrático médio (RMSE)	5,24		Erro baixo	
Viés médio (MBE)	-4,93		Subestimou (viés leve)	
Índice de Concordância de Willmott (d)	0,60		Concordância moderada	
Correlação linear de Pearson (r)	0,78		Correlação moderada positiva	

C- Cobertura do solo asfáltica com superfície exposta e índice médio de área foliar (AEM)				
Métricas climatológicas e análises	ENVI-met	Edu-Clima	Desvio entre os modelos (°C)	Varição entre os modelos (%)
Temperatura Máxima (°C)	33,23	27,98	5,25	17,15
Temperatura Mediana (°C)	30,09	24,55	5,54	20,28
Temperatura Mínima (°C)	25,60	19,59	6,01	26,60
ANOVA da regressão cúbica (p- valor)	<0,001	<0,001	Análise Interpretativa	
Teste de Wilcoxon (p- valor) (N=23)	2,38E-07		Significativo ($\alpha = 0,05$)	
Raiz do Erro Quadrático médio (RMSE)	5,88		Erro baixo	
Viés médio (MBE)	-5,66		Subestimou (viés leve)	
Índice de Concordância de Willmott (d)	0,57		Concordância moderada	
Correlação linear de Pearson (r)	0,84		Correlação forte positiva	

D- Cobertura do solo de concreto com superfície exposta e índice médio de área foliar (CEM)				
Métricas climatológicas e análises	ENVI-met	Edu-Clima	Desvio entre os modelos (°C)	Varição entre os modelos (%)
Temperatura Máxima (°C)	33,22	26,98	6,24	20,73
Temperatura Mediana (°C)	30,78	23,55	7,23	26,62
Temperatura Mínima (°C)	25,61	18,59	7,02	31,76
ANOVA da regressão cúbica (p- valor)	<0,001	<0,001	Análise Interpretativa	
Teste de Wilcoxon (p- valor) (N=23)	2,38E-07		Significativo ($\alpha = 0,05$)	
Raiz do Erro Quadrático médio (RMSE)	6,93		Erro moderado	
Viés médio (MBE)	-6,74		Subestimou (viés moderado)	
Índice de Concordância de Willmott (d)	0,52		Concordância moderada	
Correlação linear de Pearson (r)	0,85		Correlação forte positiva	

E - Cobertura do solo asfáltica com superfície exposta e alto índice de área foliar (AEA)				
Métricas climatológicas e análises	ENVI-met	Edu-Clima	Desvio entre os modelos (°C)	Varição entre os modelos (%)
Temperatura Máxima (°C)	33,01	24,98	8,03	27,69
Temperatura Mediana (°C)	30,74	21,55	9,19	35,15
Temperatura Mínima (°C)	25,43	16,59	8,84	42,08
ANOVA da regressão cúbica (p- valor)	<0,001	<0,001	Análise Interpretativa	
Teste de Wilcoxon (p- valor) (N=23)	2,70E-05		Significativo ($\alpha = 0,05$)	
Raiz do Erro Quadrático médio (RMSE)	8,72		Erro moderado	
Viés médio (MBE)	-8,57		Subestimou (viés moderado)	
Índice de Concordância de Willmott (d)	0,45		Concordância baixa	
Correlação linear de Pearson (r)	0,84		Correlação forte positiva	

F -Cobertura do solo de concreto com superfície exposta e alto índice de área foliar (CEA)				
Métricas climatológicas e análises	ENVI-met	Edu-Clima	Desvio entre os modelos (°C)	Varição entre os modelos (%)
Temperatura Máxima (°C)	33,00	23,98	9,02	31,66
Temperatura Mediana (°C)	30,60	20,55	10,05	39,30
Temperatura Mínima (°C)	25,44	15,59	9,85	48,01
ANOVA da regressão cúbica (p- valor)	<0,001	<0,001	Análise Interpretativa	
Teste de Wilcoxon (p- valor) (N=23)	2,38E-07		Significativo ($\alpha = 0,05$)	
Raiz do Erro Quadrático médio (RMSE)	9,65		Erro alto	
Viés médio (MBE)	-9,52		Subestimou (viés acentuado)	
Índice de Concordância de Willmott (d)	0,41		Concordância baixa	
Correlação linear de Pearson (r)	0,84		Correlação forte positiva	

Figura 6. Quadros comparativos das métricas climatológicas e da análise estatística das superfícies não vegetadas sob diferentes tipos de cobertura, bem como dos índices de área foliar. Valores de $p < 0,05$ indicam diferença estatisticamente significativa. N corresponde ao tamanho da amostra.

Figure 6. Comparative panels of climatological metrics and statistical analysis for non-vegetated surfaces under different cover types and leaf area index conditions. $p < 0,05$ indicates a statistically significant difference. N corresponds to the sample size.

Esses resultados reforçam que as simulações realizadas no ENVI-met e no Edu-Clima estão dentro de uma faixa aceitável, o que valida o simulador desenvolvido quanto às temperaturas obtidas ao longo das simulações e dos cenários. A variação média de temperatura entre ENVI-met e Edu-

Clima foi considerável, dependendo do cenário. No cenário de cobertura asfáltica com superfície exposta e baixo índice de área foliar, o desvio médio de temperatura foi de 3,84°C (Figura 7a). Em contraste, no cenário com cobertura de concreto, superfície vegetada e alto índice de área foliar, o

desvio de temperatura entre os simuladores atingiu 11,5 °C (Figura 7f). Isso ocorreu porque as temperaturas simuladas pelo Edu-Clima eram inferiores às projetadas pelo ENVI-met. No cenário AEB, embora as temperaturas do Edu-

Clima tenham sido menores do que as do ENVI-met, as variações percentuais foram menores do que no cenário CVA (variação mediana de 15,92% versus 49,25%).

A - Cobertura do solo asfáltica com superfície vegetada e baixo índice de área foliar (AVB)				
Métricas climatológicas e análises	ENVI-met	Edu-Clima	Desvio entre os modelos (°C)	Varição entre os modelos (%)
Temperatura Máxima (°C)	33,54	27,98	5,56	18,08
Temperatura Médiana (°C)	31,06	24,55	6,51	23,41
Temperatura Mínima (°C)	25,60	19,59	6,01	26,60
ANOVA da regressão cúbica (p- valor)	<0,001	<0,001	Análise Interpretativa	
Teste de Wilcoxon (p- valor) (N=23)	2,38E-07		Significativo ($\alpha = 0,05$)	
Raiz do Erro Quadrático médio (RMSE)	6,03		Erro baixo	
Viés médio (MBE)	-5,84		Subestimou (viés leve)	
Índice de Concordância de Willmott (d)	0,57		Concordância moderada	
relação linear de Pearson (r)	0,90		Correlação forte positiva	

C - Cobertura superficial de asfalto vegetado e índice médio de área foliar (AVM)				
Métricas climatológicas e análises	ENVI-met	Edu-Clima	Desvio entre os modelos (°C)	Varição entre os modelos (%)
Temperatura Máxima (°C)	33,28	25,98	7,30	24,64
Temperatura Médiana (°C)	30,92	22,55	8,37	31,31
Temperatura Mínima (°C)	25,65	17,59	8,06	37,28
ANOVA da regressão cúbica (p- valor)	0,1630	0,1590	Análise Interpretativa	
Teste de Wilcoxon (p- valor) (N=23)	2,70E-05		Significativo ($\alpha = 0,05$)	
Raiz do Erro Quadrático médio (RMSE)	7,94		Erro moderado	
Viés médio (MBE)	-7,78		Subestimou (viés moderado)	
Índice de Concordância de Willmott (d)	0,48		Concordância baixa	
relação linear de Pearson (r)	0,85		Correlação forte positiva	

E -Superfície asfaltada vegetada com alto índice de área foliar (AVA)				
Métricas climatológicas e análises	ENVI-met	Edu-Clima	Desvio entre os modelos (°C)	Varição entre os modelos (%)
Temperatura Máxima (°C)	33,06	22,98	10,08	35,97
Temperatura Médiana (°C)	30,79	19,55	11,24	44,66
Temperatura Mínima (°C)	25,48	14,59	10,89	54,35
ANOVA da regressão cúbica (p- valor)	<0,001	<0,001	Análise Interpretativa	
Teste de Wilcoxon (p- valor) (N=23)	2,38E-07		Significativo ($\alpha = 0,05$)	
Raiz do Erro Quadrático médio (RMSE)	10,69		Erro alto	
Viés médio (MBE)	-10,57		Subestimou (viés acentuado)	
Índice de Concordância de Willmott (d)	0,39		Concordância baixa	
relação linear de Pearson (r)	0,85		Correlação forte positiva	

B - Cobertura vegetal de concreto com superfície vegetada e baixo índice de área foliar (CVB)				
Métricas climatológicas e análises	ENVI-met	Edu-Clima	Desvio entre os modelos (°C)	Varição entre os modelos (%)
Temperatura Máxima (°C)	33,44	26,98	6,46	21,38
Temperatura Médiana (°C)	31,04	23,55	7,49	27,44
Temperatura Mínima (°C)	25,58	18,59	6,99	31,65
ANOVA da regressão cúbica (p- valor)	0,0010	0,0000	Análise Interpretativa	
Teste de Wilcoxon (p- valor) (N=23)	2,38E-07		Significativo ($\alpha = 0,05$)	
Raiz do Erro Quadrático médio (RMSE)	6,97		Erro moderado	
Viés médio (MBE)	-6,80		Subestimou (viés moderado)	
Índice de Concordância de Willmott (d)	0,52		Concordância moderada	
Correlação linear de Pearson (r)	0,89		Correlação forte positiva	

D - Cobertura vegetal de concreto com superfície vegetada e índice médio de área foliar (CVM)				
Métricas climatológicas e análises	ENVI-met	Edu-Clima	Desvio entre os modelos (°C)	Varição entre os modelos (%)
Temperatura Máxima (°C)	33,44	24,98	8,46	28,96
Temperatura Médiana (°C)	30,80	21,55	9,25	35,34
Temperatura Mínima (°C)	25,64	16,59	9,05	42,86
ANOVA da regressão cúbica (p- valor)	0,0010	0,0010	Análise Interpretativa	
Teste de Wilcoxon (p- valor) (N=23)	2,38E-07		Significativo ($\alpha = 0,05$)	
Raiz do Erro Quadrático médio (RMSE)	8,92		Erro alto	
Viés médio (MBE)	-8,78		Subestimou (viés acentuado)	
Índice de Concordância de Willmott (d)	0,44		Concordância baixa	
Correlação linear de Pearson (r)	0,86		Correlação forte positiva	

F -Cobertura de solo de concreto com superfície vegetada e alto índice de área foliar (CVA)				
Métricas climatológicas e análises	ENVI-met	Edu-Clima	Desvio entre os modelos (°C)	Varição entre os modelos (%)
Temperatura Máxima (°C)	33,05	21,98	11,07	40,23
Temperatura Médiana (°C)	30,67	18,55	12,12	49,25
Temperatura Mínima (°C)	25,47	13,59	11,88	60,83
ANOVA da regressão cúbica (p- valor)	<0,001	<0,001	Análise Interpretativa	
Teste de Wilcoxon (p- valor) (N=23)	2,38E-07		Significativo ($\alpha = 0,05$)	
Raiz do Erro Quadrático médio (RMSE)	11,65		Erro alto	
Viés médio (MBE)	-11,54		Subestimou (viés acentuado)	
Índice de Concordância de Willmott (d)	0,36		Concordância baixa	
Correlação linear de Pearson (r)	0,84		Correlação forte positiva	

Figura 7. Quadros comparativos de métricas climatológicas e análise estatística de superfícies vegetadas sob diferentes tipos de cobertura de solo e índices de área foliar. Valores de $p < 0,05$ indicam diferença estatisticamente significativa. N corresponde ao tamanho da amostra. Figure 7. Comparative tables of climatological metrics and statistical analysis of vegetated surfaces under different soil cover types and leaf area indices. $p < 0,05$ indicates a statistically significant difference. N corresponds to the sample size.

As observações revelam maior variação de temperatura entre os simuladores em cenários com superfícies vegetadas (Figura 7), bem como em superfícies expostas com alto índice de área foliar, sugerindo que o simulador Edu-Clima é mais sensível em cenários vegetados.

A ordenação por análise multivariada, considerando o pareamento entre cenários, evidenciou uma separação nítida entre os perfis de horários simulados pelos modelos ENVI-met e Edu-Clima. Esse padrão foi confirmado pela PERMANOVA, realizada com base na distância euclidiana e com permutações restritas por cenário, que indicou um efeito significativo do modelo sobre a estrutura dos dados ($R^2 = 0,8456$; $p = 0,0007$). Portanto, os modelos diferem significativamente quanto à resposta térmica horária simulada.

A análise multivariada permitiu observar diferenças entre os simuladores com base em múltiplas variáveis simultaneamente. A análise demonstrou que as ferramentas apresentam um padrão de resposta semelhante ao das variáveis ambientais, como o tipo de solo e a cobertura vegetal. As diferenças observadas decorrem, em grande parte, da simplificação intencional do modelo do Edu-Clima, que prioriza a facilidade de uso e a acessibilidade em detrimento da precisão computacional do ENVI-met.

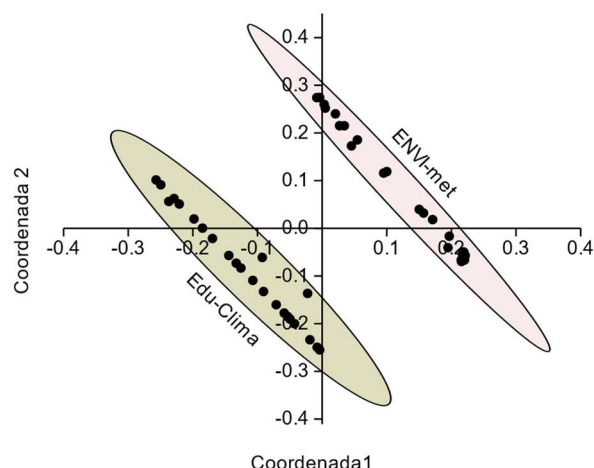


Figura 8. Análise Principal de Coordenadas (PCoA) das distribuições de cenários de simulação entre ENVI-Met e Edu-Clima, com base nas variáveis climatológicas extraídas. Figure 8. Principal Coordinate Analysis (PCoA) of the distributions of simulation scenarios between ENVI-Met and Edu-Clima according to the extracted climatological variables.

4. DISCUSSÃO

Do ponto de vista metodológico, o Edu-Clima desempenha um papel estratégico ao alinhar-se às tendências da educação digital e da cidadania climática. Conforme observado por Zourmpakis et al. (2023), o uso de narrativas e de elementos visuais no ensino de ciências, como gráficos, mapas e simulações, aumenta o engajamento discente e aprimora a compreensão conceitual.

A sensibilidade do aplicativo a variações nos parâmetros de entrada (cobertura, vegetação e horário) permite experimentar cenários térmicos em tempo real, tornando-o uma ferramenta útil para o ensino baseado em investigação, a aprendizagem baseada em problemas (PBL) e a gamificação. Essa abordagem converge com o ODS 4, reforçando a importância de metodologias que promovam a formação crítica na educação ambiental (VIVAR; PEÑALVO, 2023).

Apesar da boa associação entre os modelos, os valores simulados pelo Edu-Clima foram, em regra, inferiores aos do ENVI-met nos cenários de asfalto e de concreto, em diferentes níveis do índice de área foliar. Embora ambos reproduzam a mesma tendência de variação térmica, evidenciada pelos coeficientes de correlação de *Pearson* e pelos valores de R^2 , é imperativo notar que tais métricas expressam associação, mas não equivalência absoluta entre os métodos (METSÄMUURONEN, 2022). Os coeficientes angulares confirmam que o Edu-Clima acompanhou o sentido das variações do ENVI-met, caracterizando uma subestimação relativa, porém mantendo-se mais próximo ao cenário real observado.

A interpretação da performance foi além da significância estatística, integrando erro, viés e concordância (Stefanidis et al., 2020), e mostrou que os menores valores de RMSE em AEB, CEB, AEM e AVB indicam maior proximidade entre os modelos, enquanto os índices mais elevados em CVA, AVA, CEA e CVM evidenciam distanciamentos mais acentuados; ao mesmo tempo, o viés médio (MBA) negativo reforça a subestimação sistemática do Edu-Clima, embora a tendência térmica geral permaneça compartilhada com o ENVI-met. Esse comportamento sugere que o Edu-Clima apresenta melhor desempenho em cenários mais simples, nos quais predominam efeitos térmicos mais diretos relacionados ao material de cobertura e à exposição superficial, como em AEB, CEB e AEM, ao passo que sua capacidade de ajuste se reduz em cenários como CVA, AVA, CEA e CVM, nos quais a configuração espacial exige a representação integrada de processos ecossistêmicos e microclimáticos mais complexos, como sombreamento, evapotranspiração, armazenamento hídrico e interação entre vegetação e materiais urbanos (AL-HAJRI et al., 2025).

Assim, os resultados indicam que as maiores divergências entre os modelos se concentram justamente nas situações em que a dinâmica térmica depende da articulação simultânea desses mecanismos, corroborando a literatura recente ao apontar que a resposta térmica de áreas vegetadas é fortemente condicionada pela estrutura da vegetação e pela interação entre fluxos de energia e umidade, o que amplia a complexidade da modelagem e tende a aumentar as diferenças entre modelos simplificados e modelos fisicamente mais detalhados (SAGUIN et al., 2024).

De forma complementar, o índice de concordância de Willmott et al. (2015) e o teste de Wilcoxon pareado ($p < 0,01$) confirmam que o Edu-Clima reproduz o

comportamento horário do ENVI-met com amplitude reduzida. Tais discrepâncias são esperadas em simulações, visto que diferentes programas possuem formulações e simplificações físicas distintas; como notado por Schünemann et al. (2023), as divergências decorrem das próprias estruturas de modelagem e não apenas das condições de entrada.

Embora a regressão linear sirva como referência de validação, a função exponencial mostrou-se adequada para descrever a relação dos dados, apresentando ajustes precisos (R^2). A ANOVA da regressão cúbica confirmou a significância estatística dessa curva em todos os cenários. Esse comportamento não linear é coerente com a dinâmica das variáveis microclimáticas e com a interação entre radiação, ventilação e cobertura vegetal, padrão já descrito na literatura urbana (FAN et al., 2025). Esses resultados são validados pelo contexto de Cuiabá-MT, no qual o comportamento climático simulado segue a tendência regional de picos térmicos entre 10h00 e 14h00 (CALLEJAS; KRÜGER, 2022). A influência da hora do dia foi determinante em ambas as ferramentas de Kou et al. (2022), e os intervalos registrados situam-se na faixa esperada para o Mato Grosso (MACHADO; GONZALEZ, 2021; CARMO et al., 2023).

O uso de boas práticas de *software*, como a modularização do código, favorece a manutenção e a transparência do Edu-Clima, permitindo que a comunidade contribua com melhorias (TOZZI et al., 2024). Além disso, a presença de tabelas e gráficos interativos é fundamental para que os estudantes desenvolvam habilidades interpretativas sofisticadas, superando desafios comuns na leitura dessas representações (PERIN; CAMPO, 2022; CASTRO et al., 2024).

Os perfis horários simulados pelo ENVI-met e pelo Edu-Clima apresentam diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,01$), refletidas na Análise Principal de Coordenadas (PCoA) por meio de uma clara separação entre as estruturas térmicas dos modelos. Embora essa distinção indique que o Edu-Clima organiza as respostas térmicas de forma distinta do ENVI-met, Santos et al. (2026) reiteram que tais diferenças sistemáticas na estrutura temporal não invalidam a tendência geral observada. Nesse sentido, a significância apontada pela PERMANOVA decorre da simplificação intencional do Edu-Clima para fins de acessibilidade e facilidade de uso. Contudo, como ambos os modelos mantêm uma organização estrutural comparável e respondem de forma semelhante a variáveis como o solo e a vegetação, a análise multivariada (PCoA e PERMANOVA) confirma que o Edu-Clima reproduz fielmente os conceitos fundamentais da climatologia urbana, consolidando-se como uma ferramenta confiável e eficaz para o ensino (BELOUAFI, 2017).

Ainda assim, na interpretação desses achados consideramos dois limites importantes. Primeiro, a generalização dos resultados permanece condicionada ao recorte adotado neste estudo, baseado em um conjunto específico de cenários derivados de condições climáticas e urbanas de Cuiabá, o que recomenda cautela ao extrapolar o desempenho do Edu-Clima para outros contextos climáticos, sazonais ou morfológicos sem novas verificações. Em segundo lugar, o ENVI-met deve ser compreendido aqui como um *benchmark* técnico-comparativo.

5. CONCLUSÕES

Embora o ENVI-met tenha um banco de dados robusto e seja uma das principais ferramentas de simulação climática, o simulador criado para fins didáticos possui uma interface simples e intuitiva para definir parâmetros climáticos básicos, como a temperatura média, a temperatura mínima e sua evolução ao longo do tempo.

As análises também destacaram maiores desvios em cenários com vegetação densa, especialmente quando associados a solos vegetados, como no cenário CVA (Concreto, Vegetado, Alto IAF). Esses desvios superiores a 11 °C e variações percentuais próximas de 47% indicam que o Edu-Clima ainda não incorpora com precisão os efeitos da evapotranspiração, do sombreamento natural e da umidade do solo, aspectos que são melhor modelados pelo ENVI-met. Essa limitação, no entanto, é compreensível e aceitável no escopo de uma ferramenta construída com código aberto e, até agora, alimentada com dados simplificados para fins educacionais.

Embora suas limitações em relação à modelagem de vegetação sejam evidentes, não comprometem sua validade como ferramenta de ensino. Em contraste, elas revelam pontos de desenvolvimento futuro, permitindo que a ferramenta avance em termos de robustez sem perder sua essência didática e intuitiva.

Por fim, os resultados sugerem que o Edu-Clima cumpre seu propósito de ser um simulador educacional, acessível e funcional. A análise também mostra que a ferramenta pode ser entendida como uma contribuição alinhada ao ODS 4, pois favorece práticas educacionais que integram inovação tecnológica e treinamento voltado à sustentabilidade.

6. REFERÊNCIAS

- ABDUL GHANI, A.S., ABDUL RAHIM, A.F., YUSOFF, M.S.B.; HADIE, S. N. H. Developing an interactive PBL environment via persuasive gamify elements: a scoping review. **RPTEL**, v. 17, e21, 2022. <https://doi.org/10.1186/s41039-022-00193-z>
- AL-HAJRI, S.; AL-RAMADAN, B.; SHAFIULLAH, M.; RAHMAN, SM. Microclimate Performance Analysis of Urban Vegetation: Evidence from Hot Humid Middle Eastern Cities. **Plants**, v. 8, n. 14, e 521, 2025. <https://doi.org/10.3390/plants14040521>
- ALMAZROUI, M.; ASHFAQ, M.; ISLAMM, N.; RASHID I. U.; KAMIL, S.; ABID, M. A.; O'BRIEN, E.; ISMAIL, M.; REBOITA, M. S.; SÖRENSSON, A. A.; ARIAS, P. A.; ALVES, L. M.; TIPPETT, M. K.; SAEED, S.; HAARSM, R.; DOBLAS-REYES, F. J.; SAEED, F.; KUCHARSKI, F.; NADEEM, I.; SILVA-VIDAL, Y.; RIVERA, J. A.; EHSAN, M. A.; MARTÍNEZ-CASTRO, D.; MUÑOZ, A. G.; ALI, M. A.; COPPOLA, E.; SYLLA, M. B. Assessment of CMIP6 performance and projected temperature and precipitation changes over South America. **Earth Systems and Environment**, v. 5, n. 2, p. 155-183, 2021. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-0023-3>
- ANDERSON, A. Climate change and sustainability literacy: a mixed-methods study of attitudes to climate education in secondary schools. **Climatic Change**, v. 177, n. 169, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10584-024-03815-1>
- BELOUAFA, S.; HABTI, F.; BENHAR, S.; BELAFKIH, B.; TAYANE, S.; HAMDOUCH, S.; BENNAMARA, A.; ABOURRICHE, A. Ferramentas e abordagens estatísticas para validar métodos analíticos: metodologia e exemplos práticos. **Revista Internacional de Metrologia e Engenharia da Qualidade**, v. 8, e9, 2017. <https://doi.org/10.1051/ijmqe/2016030>
- CALLEJAS, I. J. A.; KRÜGER, E. Microclimate and thermal perception in courtyards located in a tropical savannah climate. **International Journal of Biometeorology**, v. 66, n. 9, p. 1877-1890, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00484-022-02329-8>
- CAMPS-VALLS, G.; FERNÁNDEZ-TORRES, M.; COHRS, K.; HÖHL, A.; CASTELLETTI, A.; PACAL, A.; ROBIN, C.; MARTINUZZI, F.; PAPOUTSIS, I.; PRAPAS, I.; PÉREZ-ARACIL, J.; WEIGEL, K.; GONZALEZ-CALABUIG, M.; REICHSTEIN, M.; RABEL, M.; GIULIANI, M.; MAHECHA, M. D.; POPESCU, O.-I.; PELLICER-VALERO, O. J.; OUALA, S.; SALCEDO-SANZ, S.; SIPPEL, S.; KONDYLATOS, S.; HAPPÉ, T.; WILLIAMS, T. Artificial intelligence for modeling and understanding extreme weather and climate events. **Nature Communications**, v. 16, n. 1, e1919, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-56573-8>
- CARMO, E. L. I.; REBOITA, M. S.; MARQUES, R. Evolução temporal das variáveis atmosféricas associadas a casos de frentes frias fortes em Cuiabá, MT, entre 1996 e 2015. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 1, p. 145-154, 2023. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.1.p145-154>
- CASTRO, E. R.; BARRETO, M. C.; NASCIMENTO, F. J.; SOUSA, G. L. Construction and interpretation of statistical tables and graphs: a look at the attitude of teachers in training. **Ensino em Re-Vista**, v. 31, p. 1-24, 2024. <http://doi.org/10.14393/ER-v31e2024-07>
- CHICCO, D.; WARRENS, M. J.; JURMAN, G. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. **PeerJ Computer Science**, v. 7, e623, 2021. <http://doi.org/10.7717/peerj-cs.623>
- FAN, P.; WANG, H.; IMBROGLINI, C. Hourly impact of urban forests on land surface temperature based on machine learning. **Results in Engineering**, v. 28, e107584, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107584>
- FONSECA, M. N. O ensino de climatologia em ambientes urbanos: uma proposta metodológica. **Boletim Gaúcho de Geografia**, v. 49, n. 2, p. 55-73, 2022. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18526307>
- KIM, D. Y.; KWON, O. How open source artificial intelligence democratizes and improves science: evidence from structural biology. **SSRN Pre-Prints**, p. 1-46, 2025. <http://doi.org/10.2139/ssrn.5219337>
- KOU, Y.; XIAN, D.; LIU, Y.; CHEN, J.; WANG, C.; CHENG, B.; GUO, W.; LI, Y.; TANG, L. Factors affecting urban climate at different times of the day in China: a case study in Yibin, a riverside mountain city. **Nature-Based Solutions**, v. 2, e100043, 2022. <http://doi.org/10.1016/j.nbsj.2022.100043>
- KUROKAWA, H.; IGEI, K.; KITSUKI, A.; KURITA, K.; MANAGI, S.; NAKAMURO, M.; SAKANO, A. Improvement impact of nudges incorporated in environmental education on students' environmental knowledge, attitudes, and behaviors. **Journal of Environmental Management**, v. 325, e116612, 2023. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116612>

- LIU, T.; OUBIBI, M.; ZHOU, Y.; FUTE, A. Research on online teachers' training based on the gamification design: A survey analysis of primary and secondary school teachers. **Heliyon**, 9, n. 4, e15053, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15053>
- LOZANO-DÍAZ, A.; FERNÁNDEZ-PRADOS, J. S. Educating digital citizens: an opportunity to critical and activist perspective of sustainable development goals. **Sustainability**, v. 12, n. 18, e7260, 2020. <http://doi.org/10.3390/su12187260>
- MACHADO, C. S. D.; GONZÁLEZ, A. Z. D. Variabilidade climática no bioma Cerrado de Mato Grosso durante as últimas décadas. **Revista Equador**, v. 10, n. 2, p. 207-227, 2021. <http://doi.org/10.26694/equador.v10i2.12763>
- MAKVANDI, M.; LI, W.; OU, X.; CHAI, H.; KHODABAKHSHI, Z.; FU, J.; YUAN, P. F.; DE LA JOIE HORIMBERE, E. Mitigation of urban heat for climate change adaptation: an eco-sustainable design strategy to improve environmental performance amid rapid urbanization. **Atmosphere**, v. 14, n. 4, e638, 2023. <http://doi.org/10.3390/atmos14040638>
- MARANHOLI, H. N. G.; SANTOS, F. M. M. O método científico e a compreensão das variáveis ambientais no contexto educacional: uma revisão. **Cadernos Cajuína**, v. 9, n. 5, e249525, 2024. <https://doi.org/10.52641/cadcajv9.i5.638>
- METSÄMUURONEN, J. Directional nature of the product-moment correlation coefficient and some consequences. **Frontiers in Psychology**, v. 13, e 988660, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.988660>
- PACIFICI, M.; NIETO-TOLOSA, M. Comparing ENVI-Met and Grasshopper modeling strategies to assess local thermal stress and urban heat island effects. In: **Urban microclimate modeling for comfort and energy studies**. Cham: Springer, 2021. p. 293-316. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65421-4_14
- PERIN, A. P.; CAMPO, C. R. Leitura e interpretação de gráficos estatísticos por alunos do 2º ano do ensino médio. **Revista Baiana de Educação Matemática**, v. 3, n. 1, e202227, 2022. <https://doi.org/10.47207/rbem.v3i01.15645>
- RIUTTANEN, L.; RUUSKANEN, T.; ÄIJÄLÄ, M.; LAURI, A. Society needs experts with climate change competencies: what is the role of higher education in atmospheric and Earth system sciences? **Tellus B: Chemical and Physical Meteorology**, v. 73, n. 1, p. 1-14, 2021. <https://doi.org/10.1080/16000889.2021.1967845>
- SAGUIN, E.; SALOMÉ, J.; FAVODON, B.; LAHUTTE, B.; GIGNOUX-FROMENT, F. Validation of a didactic model evaluating the usability, usefulness and acceptability of psychological first aid teaching through simulation. **BMC Medical Education**, v. 24, e1431, 2024. <https://doi.org/10.1186/s12909-024-06491-y>
- SANTOS, M. E. M.; BONFIM, R. G.; PAIVA, R. L. F.; NUNES, J. L. S. Influence of the structural complexity of phytal substrates on intertidal meiofaunal community structure in a tropical system (NE Brazil). **Community Ecology**, p. 1-10, 2026. <https://doi.org/10.1007/s42974-026-00292-7>
- SCHÜNEMANN, C.; ZIEMANN, A.; GOLDBERG, V. Spatially resolved indoor overheating evaluation using microscale meteorological simulation as input for building simulation—opportunities and limitations. **City and Environment Interactions**, v. 20, e100122, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2023.100122>
- STEFANIDIS, S., DAFIS, S., STATHIS, D. Evaluation of regional climate models (RCMs) performance in simulating seasonal precipitation over Mountainous Central Pindus (Greece). **Water**, v. 12, n. 10, e2750, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12102750>
- STREB, V.; FERREIRA, M. D.; GOMES, A. F.; CECCHIN, A. S.; REGINATTO, A. A.; ROCHA, K. M. da. Teoria x prática: panorama inicial sobre a inserção das tecnologias digitais no ensino superior presencial e a distância na UFSM. **Revista Brasileira de Desenvolvimento**, v. 7, n. 4, p. 41318-41331, 2021. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n4-544>
- TOZZI, C. C. C.; OLIVEIRA, I. de S. B. de; BONICENHA, L. C.; CAMPANIN, M. A. A.; DONA, R. A. M.; ONOFRE, V.; ANDREZA, W. G. G. Mídias digitais na educação online: o impacto da linguagem audiovisual e ferramentas colaborativas. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 10, n. 10, p. 3723-3729, 2024. <https://doi.org/10.51891/rease.v10i10.16362>
- TRANE, M.; GIOVANARDI, M.; PEJOVIC, A.; POLLO, R. Overview on urban climate and microclimate modeling tools and their role to achieve the sustainable development goals. In: **Architecture and Design for Industry 4.0. Theory and practice**. Cham: Springer, 2023. p. 247–267. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36922-3_15
- TWARDOSZ, R.; WALANUS, A.; GUZIK, I. Warming in Europe: recent trends in annual and seasonal temperatures. **Pure and Applied Geophysics**, v. 178, n. 10, p. 4021-4032, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02847-7>
- VIEIRA, S. F.; GOMES, M. F. V. B. O processo de ensino e aprendizagem de Geografia com jogos digitais de simulação de cidades. **Signos Geográficos**, v. 7, p. 1-20, 2025. <https://doi.org/10.5216/signos.v7.81351>
- VIVAR, J. M. F.; PEÑALVO, F. J. G. Reflections on the ethics, potential, and challenges of artificial intelligence in the context of quality education (SDG 4). **Comunicar**, n. 74, p. 37-47, 2023. <https://doi.org/10.3916/C74-2023-03-02>
- WASKOM, M. L. Seaborn: statistical data visualization. **Journal of Open Source Software**, v. 6, n. 60, e3021, 2021. <https://doi.org/10.21105/joss.03021>
- WILLMOTT, C. J.; ROBESON, S. M.; MATSUURA, K.; FICKLIN, D. L. Assessment of three dimensionless measures of model performance. **Environmental Modeling & Software**, v. 73, p. 167-174, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.08.012>
- ZHANG, F.; BRYNILDSDRUD, H.; PAPAVALASOPOULOU, S.; SHARMA, K.; GIANNAKOS, M. Where inquiry-based science learning meets gamification: a design case of Experiverse. **Behavior & Information Technology**, v. 44, n. 5, p. 1099-1121, 2025. <https://doi.org/10.1080/0144929X.2024.2433058>
- ZOURMPAKIS, A. I.; KALOGIANNAKIS, M.; PAPANAKIS, S. Adaptive gamification in science education: an analysis of the impact of implementation and adapted game elements on students' motivation. **Computers**, v. 12, n. 7, e143, 2023. <https://doi.org/10.390/computers12070143>

Agradecimentos: A Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de Mato Grosso (FAPEMAT).

Contribuições dos autores: H.N.G.M.: conceitualização, metodologia, análise estatística, redação (original), redação (revisão e edição); F.M.M.S.: conceitualização, supervisão; V.H.M.: software; metodologia, redação (original); W.T.O.S.M.: metodologia; validação; W.F.R.M.: metodologia, análise estatística, redação (original), redação (revisão e edição). Todos os autores leram e aprovaram a versão final do manuscrito.

Financiamento: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso (FAPEMAT) pelo apoio financeiro concedido ao Projeto de Pesquisa 59362.827.40361.22072025 – Edital FAPEMAT 010/2025 - Doutorado com produto tecnológico

Disponibilidade de dados: O conjunto de dados está disponível mediante solicitação aos autores correspondentes.

Conflito de interesses: Os autores declaram não haver conflito de interesses.



Copyright: © 2026 by the authors. This article is an Open-Access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons **Attribution-NonCommercial (CC BY-NC)** license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).