

MODELAGEM MULTICRITERIAL DA ILHA DE CALOR ATMOSFÉRICA: ANÁLISE APLICADA EM PRESIDENTE VENCESLAU-SP, BRASIL

Danielle Frasca Teixeira

Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente,
SP, Brasil

E-mail: danielle.frasca@unesp.br

Margarete Cristiane de Costa Trindade Amorim

Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente,
SP, Brasil

E-mail: margarete.amorim@unesp.br

Resumo

As ilhas de calor atmosféricas constituem efeito direto do clima urbano. Resultam das alterações na atmosfera próxima à superfície em resposta à urbanização e se formam, notadamente, em condições meteorológicas estáveis. As recentes pesquisas da área da climatologia urbana indicam que o fenômeno também ocorre em cidades de pequeno porte. No ambiente tropical, ele intensifica episódios de desconforto térmico. Diante da necessidade de estudos do clima em escala local, este artigo aplica a modelagem multicritérios para representar a ilha de calor atmosférica em Presidente Venceslau (SP). A modelagem combinou a temperatura medida por transectos móveis com dados de uso da terra e o relevo. Adotou-se a estatística de regressão linear simples e múltipla, bem como a realização de testes de significância para a comprovação da validade dos modelos elaborados. O recorte temporal do estudo envolveu dois episódios noturnos (02 de abril e 15 de setembro de 2017), representativos de sistemas atmosféricos estáveis. Os resultados demonstraram que o uso e a cobertura da terra e o relevo influenciam significativamente a distribuição da temperatura do ar entre as áreas urbanas e rural. O diagnóstico de áreas aquecidas nas áreas urbanas pode instrumentalizar planos de mitigação do calor urbano, sobretudo, nas áreas urbanas em expansão.

Palavras-chave: Clima urbano; Ilha de calor atmosférica; Modelagem multicriterial; Representação espacial.

MULTICRITERIA MODELING OF THE ATMOSPHERIC HEAT ISLAND: ANALYSIS APPLIED TO PRESIDENTE VENCESLAU-SP, BRAZIL

Abstract

Atmospheric heat islands are a direct effect of the urban climate. They result from changes in the atmosphere near the surface in response to urbanization and are formed, notably, in stable weather conditions. Recent research in the field of urban climatology indicates that the phenomenon also occurs in small cities. In tropical environments, it intensifies episodes of thermal discomfort. Given the need to study climate on a local scale, this article applies multi-criteria modeling to represent the atmospheric heat island in Presidente Venceslau (SP). The modeling combined the temperature measured by mobile transects with land use and relief data. Simple and multiple linear regression statistics were used, as well as significance tests to prove the validity of the models developed. The time frame of the study involved two nocturnal episodes (April 2 and September 15, 2017), representative of stable atmospheric systems. The results showed that land use, land cover and relief significantly influence the distribution of air temperature between urban and rural areas. The diagnosis of heated areas in urban areas can provide tools for urban heat mitigation plans, especially in expanding urban areas.

Key words: Urban climate; Urban Heat Island; Multicriteria modeling; Spatial representation.

MODELIZAÇÃO MULTICRITÉRIO DE LA ISLA DE CALOR ATMOSFÉRICA: ANÁLISIS APLICADO A PRESIDENTE VENCESLAU-SP, BRASIL

Resumen

Las islas de calor atmosférico son un efecto directo del clima urbano. Son el resultado de cambios en la atmósfera cercana a la superficie en respuesta a la urbanización y se forman, sobre todo, en condiciones meteorológicas estables. Investigaciones recientes en el campo de la climatología urbana indican que el fenómeno también se produce en ciudades pequeñas. En los ambientes tropicales, intensifica los episodios de incomodidad térmica. Dada la necesidad de estudiar el clima a escala local, este artículo aplica la modelización multicriterio para representar la isla de calor atmosférica en Presidente Venceslau (SP). La modelización combinó la temperatura medida mediante transectos móviles con datos sobre el uso del suelo y el relieve. Se utilizaron estadísticos de regresión lineal simple y múltiple, así como pruebas de significación para demostrar la validez de los modelos desarrollados. El marco temporal del estudio abarcó dos episodios nocturnos (2 de abril y 15 de septiembre de 2017), representativos de sistemas atmosféricos estables. Los resultados mostraron que el uso del suelo, la ocupación del suelo y el relieve influyen significativamente en la distribución de la temperatura del aire entre zonas urbanas y rurales. El diagnóstico de zonas calentadas en áreas urbanas puede proporcionar herramientas para planes de mitigación del calor urbano, especialmente en áreas urbanas en expansión.

Palabras-clave: Clima urbano; Isla de calor atmosférica; Modelización multicriterio; Representación espacial.

Introdução

As características dos ambientes construídos alteram a atmosfera próxima à superfície favorecendo a formação de ilhas de calor atmosféricas da camada inferior urbana (ICU_{ucl}) (Oke, 1987). O fenômeno é conceituado como o excesso de calor antropogênico nos centros urbanos, em relação ao rural circundante que se forma pelo aquecimento das superfícies urbanizadas em condições meteorológicas estáveis (Oke, 1987).

Em regiões tropicais, as ICU_{ucl} intensificam o calor, comprometendo o conforto térmico das pessoas e contribuindo para problemas de saúde (Amorim, 2020). Consequentemente, conduzem ao maior consumo de energia para a climatização dos ambientes interiores, uma adaptação que não é amplamente acessível às populações (Gartland, 2010; Teixeira, 2019).

Esse fenômeno de fina escala, não é restrito às grandes aglomerações urbanas, sendo presenciadas também em cidades de pequeno e médio porte populacional como efeitos diretos do clima urbano, que é definido como o clima de um lugar e sua urbanização (Monteiro, 1976).

A preocupação com o calor urbano ocorre desde o período industrial, a partir de estudos clássicos que diagnosticavam diferenças entre a atmosfera da cidade e seu entorno

rural, como o trabalho de Howard (1833 apud Landsberg, 1981) que foi precursor tomando a cidade de Londres, Inglaterra como objeto de estudo.

Tais estudos continham forte viés meteorológico, considerando os estados médios da atmosfera, sem preocupação com a origem e a dinâmica dos processos climáticos.

A produção internacional sobre o tema privilegia os trabalhos de Oke (1982; 1987), que se dedicou a análise do modelo de balanço energético como gênese do fenômeno, assim como na diferenciação dos níveis atmosféricos em que se desenvolvem as colunas de aquecimento.

Contudo, o alcance de uma abordagem dinâmica é amplamente reconhecido na interpretação do clima a partir da Geografia, com a contribuição brasileira de Monteiro (1971; 1976), que primeiramente considerou os tipos de tempo na decomposição da dinâmica atmosférica e, em trabalho posterior, propôs o clima urbano como um sistema de derivação ambiental por meio de uma abordagem conjuntiva voltada ao planejamento (Monteiro, 1976, 2015).

Ao longo das últimas décadas os estudos de climatologia têm evoluído em metodologias de aquisição e tratamento de dados, com ênfase no geoprocessamento e na modelagem de dados. Destacam-se os trabalhos internacionais que se mostram robustos no cruzamento de dados, sobretudo com a incorporação de modelos matemáticos para a espacialização do fenômeno (Huang et al, 2016; Lauwaet et al., 2020; Gatto et al., 2021; Romano et al., 2021).

Nesse particular, a presente pesquisa está fundamentada na perspectiva teórica e metodológica do Sistema Clima Urbano, no escopo metodológico do subsistema termodinâmico, que tem o conforto térmico como filtro perceptivo humano. A pesquisa foi aplicada a uma cidade de pequeno porte populacional inserida no ambiente tropical continental. A aquisição de dados deu-se por pesquisa de campo e o tratamento foi a modelagem multicritérios processada em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG) a partir de cruzamento de informações espaciais (sítio urbano) com a temperatura do ar (Teixeira, 2019).

A abordagem da problemática atende a necessidade de contextualizar o calor urbano no âmbito das mudanças climáticas evidenciadas na modernidade, considerando a escala local dos processos climáticos, que envolvem tanto as complexidades controladas pela natureza quanto os fatores antropogênicos, com ênfase na produção dos espaços urbanos (Sant'Anna Neto, 2013).

Desenvolvimento

Materiais e métodos

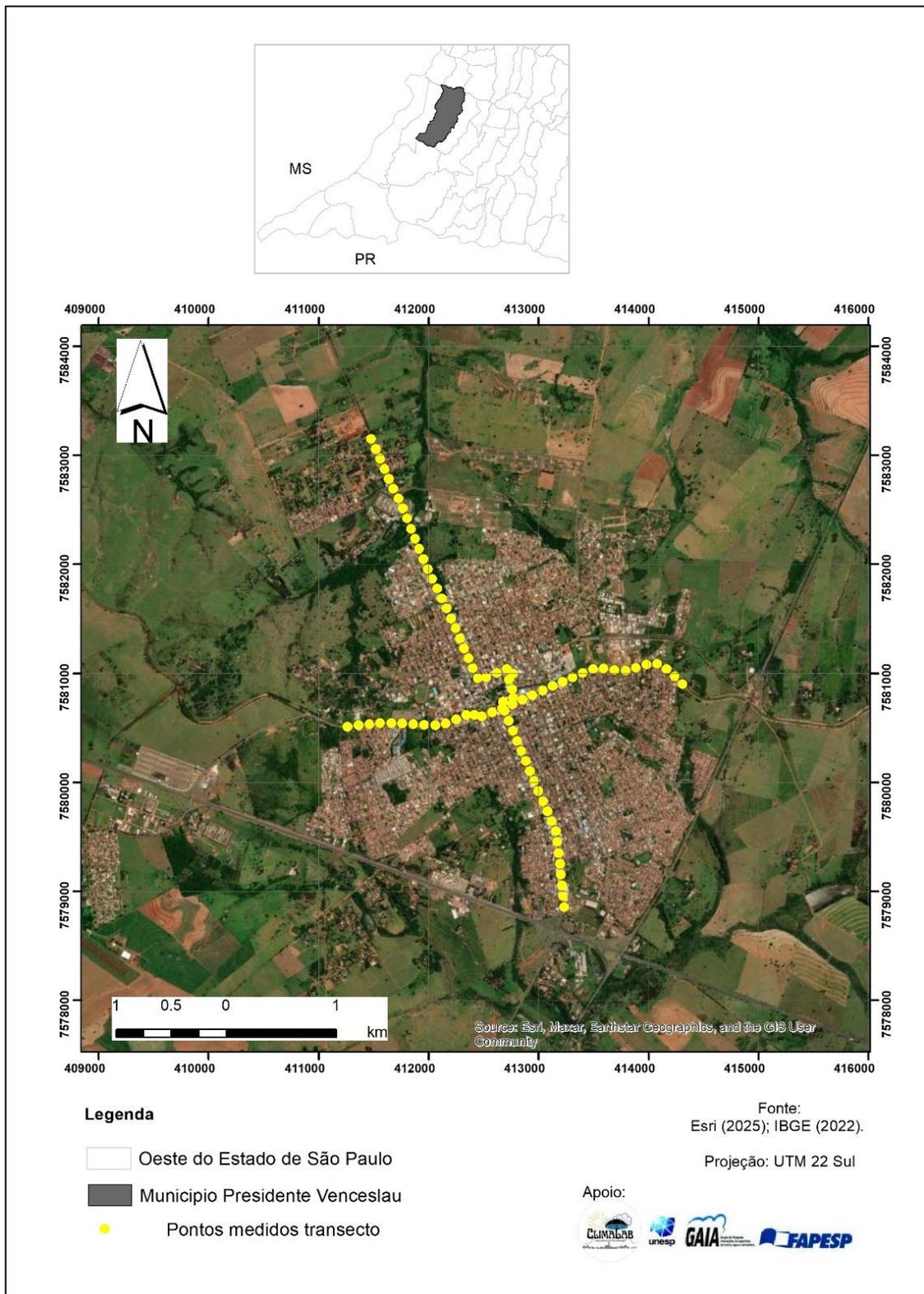
Nas cidades de pequeno porte, as ICU_{ucl} configuram-se tanto no perfil clássico, quando o aquecimento é em favor do centro, como também através de vários núcleos ou arquipélagos de calor, claramente associados à heterogeneidade da densidade construtiva dos espaços intraurbanos, enquanto áreas verdes atenuam os efeitos da temperatura do ar e favorecem a formação das ilhas frias (Mendonça, 2004; Gartland, 2010).

Ao assumir que as cidades pequenas também reúnem condições para alteração de seus ambientes atmosféricos, destacou-se a cidade de Presidente Venceslau-SP como área de interesse para o estudo do perfil térmico noturno, expresso pela intensidade das ilhas de calor atmosféricas (Fernandez García, 1996). O período de análise considerou observações realizadas em 02 de abril e 15 de setembro de 2017.

Presidente Venceslau é uma cidade de pequeno porte, localizada a 610 km de São Paulo, capital do estado (Figura 1). De acordo com o Censo 2022, conta com 35.201 habitantes e a densidade demográfica era de 46 hab/km. A estimativa populacional para o ano de 2024 segundo o mesmo órgão foi de 35.912 habitantes que se ocupa, principalmente, na agropecuária, no comércio e na prestação de serviços.

Do ponto de vista do quadro natural, Presidente Venceslau posiciona-se em área de ocorrência do clima tropical continental, numa faixa de transição de “[...] confronto entre os climas controlados pelos sistemas tropicais e pelos extratropicais (polares), além dos fenômenos frontológicos” (Sant’Anna Neto, 2000, p. 96), que explicam a ocorrência das precipitações.

Figura 1. Localização da área de estudo.



Elaboração: Da autora (2023).

Coleta de dados primários

As ilhas de calor atmosféricas de nível inferior ou do dossel urbano, são diagnosticadas por procedimentos de observação empírica, dentre os quais se destacam a rede meteorológica de superfície e as redes de transectos móveis (Oke, 1987; 2004). Para os fins desta pesquisa, os dados primários foram registrados a partir de transectos móveis, definidos como um “[...] monitoramento espacial cuja investigação refinada da temperatura e umidade do ar ocorre pelo uso de um sensor equipado em uma bicicleta ou carro que atravessam áreas de interesse para ver se há anomalia de umidade ou temperatura” (Oke, 2004, p. 4, tradução nossa).

Para a presente pesquisa foram realizados registros de dados às 21 horas nos dias 02/04/17 e 15/09/17. A escolha dessas datas considerou a ocorrência de condições atmosféricas estáveis, caracterizadas pela ausência de precipitação e pela presença de ventos fracos, fatores essenciais para a adequada representação da ilha de calor atmosférica. Segundo Oke (2004) o período ideal para a experimentação em campo ocorre algumas horas após o pôr do sol ou antes do nascer do sol, especialmente em noites com condições atmosféricas estáveis, caracterizadas por ventos calmos e ausência de nuvens. Nessas condições, as diferenças entre o clima local e o microclima tornam-se mais evidentes, permitindo uma análise mais precisa das variações térmicas (Oke, 2004).

O transecto móvel consiste na tomada de dados equidistantes em percursos longitudinais e latitudinais que atravessam as vias públicas de fluxo livre utilizando-se de veículos automotores (Ortiz Porangaba *et al.*, 2017). Foi utilizado somente um veículo equipado com um registrador de temperatura e umidade (modelo TH-03B da marca Impac) acoplado em sua lateral externa a partir de uma haste de 1,5 m de comprimento (Figura 2). Pela extensão da cidade se realizou o procedimento com duração máxima de 50 minutos e, dessa forma, a atmosfera não experimentou bruscas alterações naturais. O veículo percorreu aproximadamente 10 km de avenidas e ruas adjacentes no sentido latitudinal e longitudinal, sendo 5 km no trajeto oeste-leste e 4,8 km no percurso sul-norte (Figura 1).

Figura 2. Veículo preparado para aquisição de dados, transecto móvel.



Fonte: Arquivo pessoal (2015).

A temperatura do ar foi registrada a cada 100 metros percorridos, com o auxílio do hodômetro do veículo, visando a precisão das coordenadas geográficas e a garantia de que os registros fossem realizados nos mesmos pontos nos dois dias de coletas. Os trajetos foram percorridos a uma velocidade variável entre 20 e 30 km/h. As coordenadas dos pontos de registros foram tomadas a partir do traçado dos percursos no aplicativo QGis (atribuição da Creative commons).

O procedimento do transecto móvel apresenta diversas vantagens, entre as quais: 1) permite investigar a distribuição da temperatura nas vias de fluxo livre, sem interferência direta das edificações; 2) viabilidade econômica, possibilitando o monitoramento contínuo; e 3) viabiliza um maior número de registros quantitativos (mais pontos registrados) e qualitativos (relacionados às diferentes feições percorridas) conferindo maior confiabilidade estatística ao tratamento dos dados. Contudo, sua aplicação depende de condições de estabilidade atmosférica, como a ausência de chuva e ventos fracos (Ortiz-Porangaba *et al.*, 2017).

Geoprocessamento de dados climatológicos e tratamento estatístico

Com relação ao tratamento dos dados, em fina escala, é possível considerar as características superficiais a partir da modelagem multicriterial, integrando os dados

primários e as informações de cobertura da superfície num ambiente SIG. Dessa forma, se distingue os fatores mais influentes para explicar a variação espacial da temperatura do ar (Amorim; Dubreuil; Cardoso, 2015; Foissard, 2015; Gomes, 2017; Teixeira; Amorim, 2018; Teixeira, 2019)..

O tratamento de dados por modelagem multicriterial aumenta a confiabilidade na correspondência entre áreas com registros de temperatura do ar e aquelas sem cobertura de dados, mas que apresentam características superficiais homogêneas. Isso é possível a partir da estimação da temperatura por *pixel*, em janelas de observação atmosféricas que definem o nível de extrapolação, ou seja, a distância necessária para que ocorra variação térmica (Teixeira, 2019; Amorim, 2020). Os modelos foram gerados utilizando o aplicativo *Idrisi* versão Selva (marca registrada *Clark Labs*).

As informações espaciais de cobertura da superfície foram obtidas pela composição das bandas multiespectrais do satélite Landsat 8 (banda 3 - verde, banda 5 - infravermelho próximo, e banda 4 - vermelho), com resolução espacial de 30 metros¹. As imagens Landsat8 são fornecidas gratuitamente pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) possuindo muitas aplicações nos levantamentos ambientais.

Foi selecionada uma imagem de satélite representativa do recorte territorial, com interesse na classificação não-supervisionada por clusterização para a diferenciação entre a cobertura vegetal e as feições urbanas.

Outra informação do sítio urbano agregada ao modelo, o mapeamento do relevo, foi obtido a partir de imagens da Missão Topográfica Radar *Shuttle* (SRTM), no portal da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) (EMBRAPA, 2018). Esse produto foi compatibilizado na mesma resolução espacial da imagem *Landsat* 8, pelo qual se distinguiu os fundos de vale e os topos. Tanto as classes de ocupação da terra, como o modelo digital de elevação constituíram os mapas de entrada no modelo multicritérios.

Considerando que a resolução temporal do satélite de 16 dias não permitiu a coincidência da passagem do satélite e o registro dos dados primários (transectos), e que a modelagem exige informações das feições de superfície, assumiu-se que as classes de uso da terra, especialmente os tipos de vegetação (arbórea e rasteira) não apresentaram mudanças

¹A banda 3, no intervalo espectral 0,53-0,59 μm enfatiza o vigor da vegetação. A banda 4 (0,64-0,67 μm) diferencia vegetação das encostas. Finalmente, a banda 5 (0,85-0,88 μm) é utilizada para mapeamento da biomassa e linhas costeiras. Fonte das informações: Disponível em: <http://landsat.usgs.gov/best_spectral_bands_to_use.php> Acesso em: 08 maio 2019.

consideráveis no período do trabalho de campo realizado, uma vez que se trata da análise da temperatura do ar e não da temperatura de superfície. Portanto, uma imagem de satélite para caracterizar os dois monitoramentos atendeu aos objetivos do estudo, pois, apesar de dinâmico, o uso e ocupação da terra não se alterou significativamente entre os dias e meses destacados.

Para a integração dos dados primários e secundários adotou-se a estatística descritiva de regressão linear simples e múltipla, explicativas da relação entre as variáveis a partir do ajuste num diagrama de dispersão, pela qual se diferenciou as variáveis mais importantes para estimar a temperatura do ar.

Conforme a literatura preconiza:

[...] As relações entre duas variáveis: x , considerada independente, e y , considerada dependente, podem ser representadas num diagrama de dispersão, com os valores de y_i em ordenada e os de x_i em abcissa. Cada par de valores x_i e y_i fornecerá um ponto; utilizando-se, por exemplo, o método dos desvios mínimos ao quadrado, pode-se calcular a equação de uma curva de tendência que melhor se ajuste à nuvem de distribuição. O método mais simples é o da análise de regressão linear simples [...] onde α e β são constantes desconhecidas a serem determinadas e ϵ representa toda a fonte de variabilidade em y não explicada por x (LANDIM, 1998, p. 103, grifo nosso).

Desse modo, a temperatura do ar foi considerada uma variável dependente (y) ou variável resposta. As variáveis que condicionam a sua variação, chamadas independentes (x) ou preditoras, corresponderam às informações geográficas ou mapas de entrada, selecionados intencionalmente para o modelo. Cada variável independente apresentou um coeficiente parcial, ou seja, um valor de mudança em relação à variável dependente, obtido por regressão linear simples. O grau de dependência foi expresso por parâmetros geométricos e quantitativos, que foram respectivamente, a reta de regressão e o coeficiente de regressão “ r ” (Ferreira, 2014).

O outro parâmetro para a verificação de dependência entre variáveis foi dado pelo coeficiente de determinação r^2 , que, de acordo com Landim (1998, p. 106):

Valores de r^2 irão dispor-se no intervalo 0-1, fornecendo uma medida dimensional de quantidade do ajuste do modelo de regressão múltipla aos dados. Se o valor r^2 for próximo de 1, significa que as diversas variáveis x medidas são responsáveis quase que totalmente pela variabilidade de y . Caso contrário, r^2 apresentará um valor próximo a zero.

Através dos coeficientes de correlação (r) e de determinação (r^2) individuais, foi possível selecionar as variáveis independentes mais importantes para a previsão de “ y ”

(temperatura do ar), através do cruzamento das variáveis x e y na função de regressão linear múltipla. O resultado do coeficiente global (R^2 ajustado) indica a porcentagem de variação na resposta que foi explicada pelo modelo com as variáveis adotadas. A função de regressão resulta na expressão de tratamento que sintetiza matematicamente a relação entre essas variáveis.

O refinamento dos resultados ocorreu pelos testes de significância pela análise de variância (ANOVA), pelos quais se obteve o *valor-p* para comprovar a validade dos modelos e a correlação entre as variáveis. Adotou-se o nível de significância (α) de 0,05, que estabelece o intervalo de confiança de 95% e assume a probabilidade de 5% da associação não ser real e de que a correlação ocorreu por acaso.

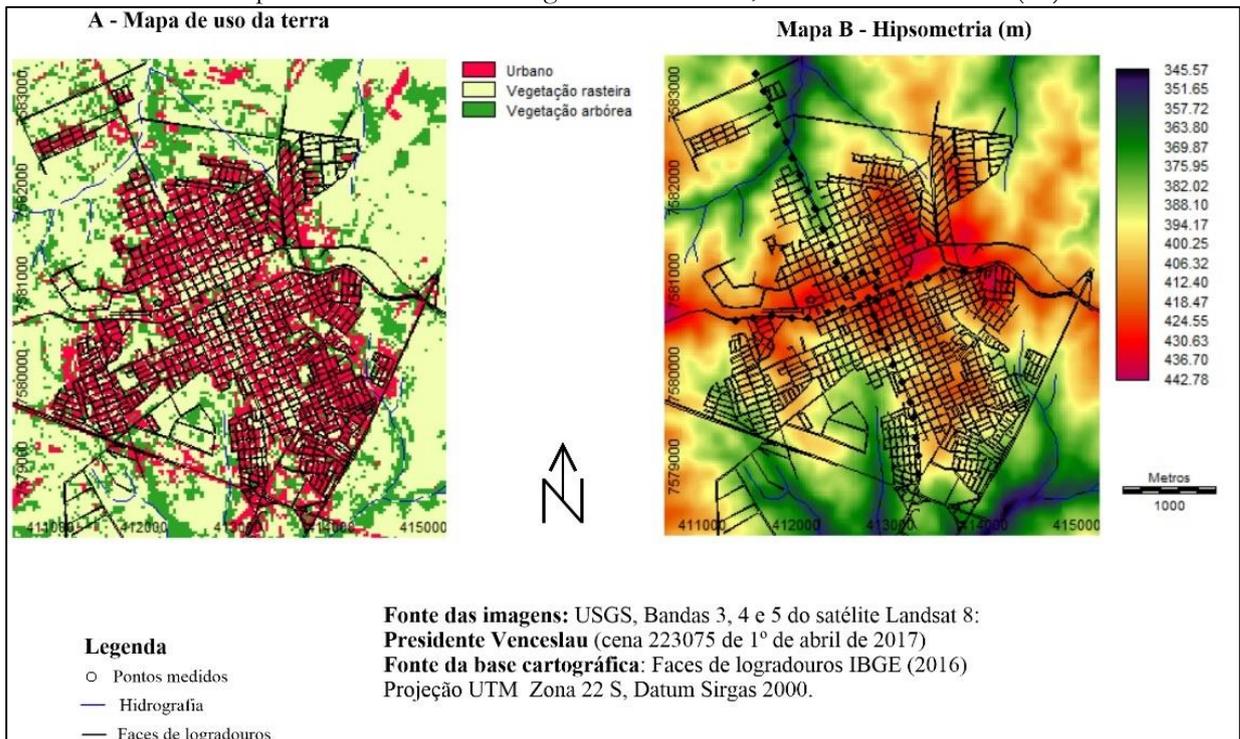
Outro teste foi realizado, e o valor de F foi considerado como um parâmetro adicional para determinar a significância dos termos em conjunto e do modelo, com base no mesmo intervalo de confiança assumido (95%).

Resultados e discussão

As variáveis explicativas incorporadas aos modelos

A partir da imagem do satélite *Landsat 8*, foi gerada a classificação não-supervisionada (*cluster*) para a diferenciação dos tipos de vegetação e das construções (Mapa A, Prancha 1), quais sejam: vegetação rasteira, vegetação arbórea e feições construídas. Também foi incluída como informação de entrada no modelo a hipsometria do sítio urbano (Mapa B, Prancha 1), que demonstrou variações entre 345 e 442 metros.

Prancha 1. Mapas de entrada da modelagem multicritérios, Presidente Venceslau (SP)



Com relação à generalização espacial dos dados coletados em campo, para a área de Presidente Venceslau verificou-se na expansão de 41 pixels por 41 pixels (1.230 por 1.230 metros) a melhor relação estatística entre os dados (Tabela 1). Dessa forma, a informação de temperatura do ar contida em um ponto de registro foi extraída a partir de um *pixel*, representando uma área homóloga de 1230 metros por 1230 metros.

Foram escolhidas para a composição do modelo as variáveis independentes classe urbana, vegetação arbórea e o relevo. Os coeficientes de correlação e determinação alcançados pelo cruzamento linear da temperatura do ar nos dias de coleta e cada uma das variáveis preditoras estão exibidas na Tabela 1.

Tabela 1: Coeficientes de correlação r obtidos nas janelas de observação atmosférica para os recortes territoriais.

Presidente Venceslau variáveis independentes ou preditoras na janela atmosférica 41 <i>pixels</i> x 41 <i>pixels</i>	02/04/17	15/09/17
Classe urbana	0,43	0,48
Classe vegetação arbórea	-0.73	-0.64
Relevo	0,59	0,62

Fonte: Trabalho de campo (2017). Organização: as autoras.

A classe 1 (urbana) demonstrou correlação linear positiva em relação à variação de y (temperatura). Os coeficientes de correlação obtidos foram 0,43, e 0,48 nos dias 02/04/17, e 15/09/17, respectivamente. Esses coeficientes multiplicadores demonstraram que ocorre um aumento significativo da temperatura do ar nesta classe, comprovando o efeito do ambiente construído na modificação da temperatura. Observou-se que as demais variáveis (vegetação arbórea e relevo) apresentaram valores superiores aos das características urbanas para explicar a variação da temperatura do ar.

A vegetação arbórea apresentou correlação negativa conforme os coeficientes multiplicadores obtidos. Colaborou significativamente para a diminuição da temperatura do ar. Individualmente, atingiu os coeficientes de correlação de -0,73 e -0,64 nos dias 02/04/17 e 15/09/17, respectivamente.

O relevo foi a componente geoambiental fundamental para a explicação da variação da temperatura do ar em Presidente Venceslau, visto que os transectos percorreram áreas de fundos de vale e de topos, atravessando por várias cotas de altimetria.

De fato, existe uma correlação linear positiva entre a variação do relevo (x) e a predição de y , observando-se que, a temperatura aumentou nas áreas mais elevadas e diminuiu nas áreas de fundos de vale nos sistemas atmosféricos atuantes.

Conhecendo-se as quantificações individuais da variabilidade de y em relação a x , as classes vegetação arbórea e relevo foram combinadas na função de regressão linear múltipla para obtenção da fórmula da predição de y (temperatura do ar). Executada a fórmula, os modelos foram submetidos ao tratamento final de reclassificação da legenda, possibilitando o agrupamento dos valores em classes de intensidade (Fernandez García, 1996). Segundo Ferreira (2014, p. 307-308):

A reclassificação é talvez a mais simples das funções, mas a que possui maior espectro de opções dentre todas as funções de modelagem de mapas para SIG. Sua principal propriedade está no fato de ela gerar, como resposta espacial, mapas binários úteis na construção de modelos de alocação espacial. Podemos afirmar que a função de reclassificação permite ao pesquisador modificar os valores originais dos atributos das classes, ou dos pixels, de acordo com os objetivos previamente definidos na lógica de consulta espacial das áreas de um mapa.

A estatística contida na etapa de processamento da fórmula foi detalhada no programa *Excel* (Marca registrada da Microsoft Corporation) através da ANOVA disponível na ferramenta de análise de dados. Observando-se os resultados do *valor-p* obtidos (Tabela 2), verificou-se que, para as amostras em questão, a classe urbana não atingiu o nível de

significância e somente as classes vegetação arbórea e o relevo foram significativas no intervalo de confiança de 95%. Dessa forma, a classe urbana, que não atingiu o nível de significância têm menor confiabilidade na associação.

Ainda assim, quando se considera o valor do F de significação e o nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$), pode-se afirmar que os modelos de regressão linear foram significativos, comprovando a validade dos mesmos pelo conjunto de todos os termos explicativos selecionados.

Tabela 2: Resultados da Regressão linear múltipla, com destaque para os valores de r^2 ajustado e os testes de significância valor-p e f (nível de significância $\alpha = 0,05$)

Presidente Venceslau	02/04/17			15/09/17		
	Valor-p	F de Significação	R ² ajustado	Valor-p	F de Significação	R ² ajustado
Modelo multicriterial 3 variáveis						
Classe urbana	0,6860	0,00	0,61	0,0983	0,00	0,56
Vegetação arbórea	0,00007			0,0172		
Relevo	0,0020			0,0003		

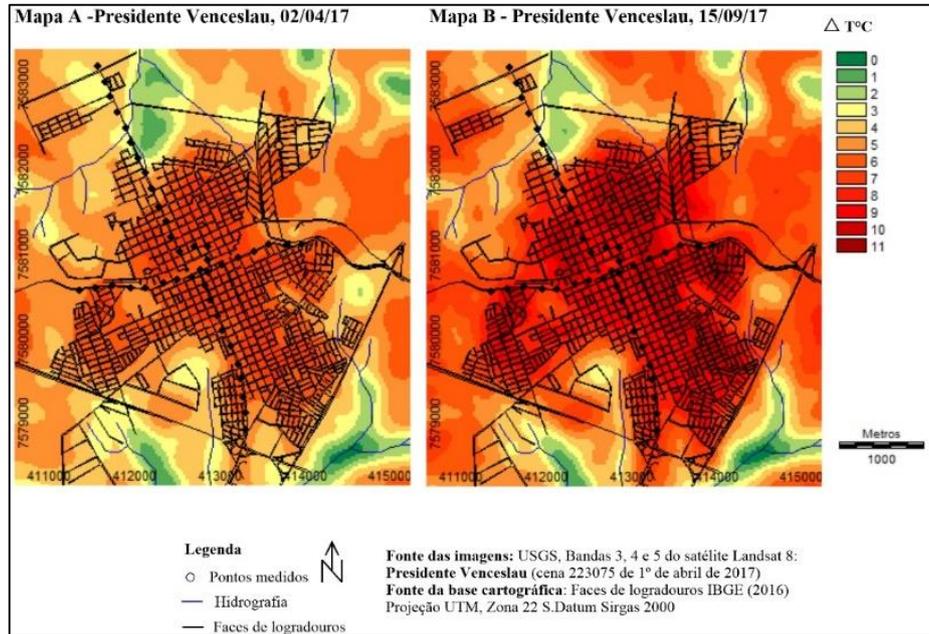
Fonte: Trabalho de campo (2017). Organização: as autoras.

Os mapas resultantes detalharam a ilha de calor, permitindo a associação inequívoca da temperatura do ar com os fatores controladores uso da terra e o relevo.

Adentrando à análise episódica, no dia 02/04/17 (Mapa A, Prancha 2), atuou na região do Oeste paulista a massa Tropical Atlântica que favoreceu ventos de até 3 m/s e direção predominante leste, sem registro de precipitação nos 5 dias anteriores ao trabalho de campo. Às 21 horas a velocidade do vento era de 1,1 m/s. Diferenciando as áreas rurais das construídas, a intensidade da ilha de calor atingiu 7°C, formando um único núcleo na área urbana de Presidente Venceslau. A temperatura (e a intensidade) diminuiu discretamente no sentido das áreas periféricas e nos fundos de vale do recorte. No extremo norte, a temperatura arrefeceu no percurso do fundo de vale, informação que o modelo pôde estimar com confiabilidade nos demais fundos de vale do recorte situados a Sudoeste e Sudeste da malha urbana.

Em 15/09/17, comparativamente foram registradas maiores intensidades da ICU_{ucl} marcando 11 °C de diferença entre o rural e área urbana (Mapa C, Prancha 2). Neste episódio a região estava influenciada pela massa Tropical atlântica continentalizada, a umidade relativa do ar era de 35 %, os ventos tinham direção nordeste e não houve precipitação nos 30 dias antecedentes à coleta dos dados.

Prancha 2: Modelos multicritérios gerados para os dias 02/04/17 e 15/09/17, Presidente Venceslau (SP).



Fonte: Da autora (2019), com adaptações.

O traço sazonal típico da região climática explicado pela ausência de precipitação e a baixa umidade relativa do ar proporcionada pela massa Tropical atlântica continentalizada explica a configuração de maior intensidade térmica no episódio de 15/09/17. A comparação desse resultado com o monitoramento anterior corrobora a relação do balanço de energia das superfícies urbanas e a influência da atmosfera, sobretudo da disponibilidade hídrica em modular o teor de aquecimento e resfriamento da superfície, contribuindo para a alternância de regimes de temperaturas expressos pela intensidade das ilhas de calor (Amorim; Dubreuil 2017). O efeito da sazonalidade do ambiente tropical foi percebido, ou seja, num episódio de inverno (15/09/17), que é naturalmente marcado pela baixa umidade do ar, acentuando a diferença térmica entre áreas rurais e urbanas.

Desse modo, as características físicas do sítio urbano, como o relevo e sua interação com os sistemas atmosféricos, influenciaram diretamente a configuração da ICU_{ucl} . Esse fenômeno é compatível com concepção sistêmica do clima urbano, que entende a cidade (e o sítio urbano) como um sistema de derivação ambiental, conforme proposto por Monteiro (1976). A participação das feições urbanas na determinação da ICU_{ucl} ficou mais próxima da significância no dia 15/09/17, inferindo que na condição de tempo seco, a influência urbana se potencializou.

Os resultados obtidos corroboram os achados de Nunes *et al.* (2024) sobre a relação entre as feições de relevo e a distribuição térmica de Presidente Prudente, cidade localizada na mesma região geográfica de Presidente Venceslau. Em ambos os recortes territoriais, observou-se que os topos do relevo são mais expostos aos fluxos de energia em comparação com os fundos de vale.

Os resultados da presente pesquisa confirmam o efeito redutor de temperaturas proporcionado pela cobertura vegetal, o que pode ser considerado no planejamento de áreas urbanas em expansão, especialmente como estratégia de mitigação. O aumento de áreas verdes e espaços abertos permeáveis se mostram como alternativas para a redução do calor urbano e para o controle de alagamentos e inundações urbanas (Silva, 2024).

Considerações finais

Por meio da modelagem multicritérios demonstrou-se estatisticamente que, em conjunto, os termos adotados para os modelos de regressão, atingiram a significância para a associação das classes de uso da terra e do relevo com a temperatura do ar. Pelo procedimento foi possível mensurar a influência das variáveis explicativas em sistemas atmosféricos estáveis baseando-se nos coeficientes de correlação (r) e determinação (r^2) global e nos testes de significância que demonstraram que o modelo linear explica a dependência de y (temperatura) em relação às variáveis x (classes de uso da terra e relevo) adotadas.

Pela quantificação das variáveis explicativas, observou-se que as características geoambientais como a vegetação arbórea e o relevo participam na estimação da temperatura no recorte territorial, não excluindo a relação das áreas urbanas com o aumento da temperatura do ar.

Os modelos confirmaram que a ilha de calor urbana se manifesta tanto nas áreas centrais quanto nas áreas periféricas, com maior intensidade nos topos malha urbana de Presidente Venceslau. As maiores intensidades distribuíram-se uniformemente nos topos, áreas que se caracterizam pela densidade construtiva, onde os efeitos da urbanização também favoreceram as maiores temperaturas. O relevo, enquanto controle natural do sítio urbano, interferiu na resposta térmica demarcando os fundos de vale como áreas redutoras da temperatura do ar.

Os resultados reforçam a importância de estudos climáticos da escala local como subsídio para as políticas públicas voltadas ao planejamento urbano resiliente as alterações

climáticas. Evidente que preservar e aumentar as áreas verdes abertas, são estratégias para amenização do calor urbano e ampliação de áreas permeáveis. O relevo é também aspecto importante para considerar na ocupação das vertentes, pois, as áreas urbanas podem estar naturalmente sujeitas às inversões térmicas, amenizando o efeito do calor, mas potencializando o frio para as populações que se fixam próximas aos fundos de vale.

Referências

AMORIM, M. C. de C. T. Aspectos conceituais e práticos da pesquisa em clima urbano. In: SILVA, C. A.; FIALHO, E. S. (org.). **Concepções e ensaios da climatologia geográfica**. Dourados: UFGD, 2012. E-book. p. 61-82.

AMORIM, M. C. C. T. **Ilhas de calor em cidades tropicais de médio e pequeno porte: teoria e prática**. 1. ed. Curitiba: Appris, 2020.

AMORIM, M. C. C. T.; DUBREUIL, V.; CARDOSO, R. S. Modelagem espacial da ilha de calor urbana em Presidente Prudente (SP) – Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, UFPR, Ano 11, v. 16, p. 29-45, 2015.

AMORIM, M. C. C. T.; DUBREUIL, V. Intensity of Urban Heat Islands in Tropical and Temperate Climates. **Climate**, v. 5, p. 91-104, 2017.

AMORIM, M. C. C. T.; DUBREUIL, V.; TEIXEIRA, D. C. F.; AMORIM, A. T.; BRABANT, C. Exceptional heat island intensities also occur in medium-sized cities. **Urban Climate**, v. 53, p. 1-18, 2024.

EMBRAPA TERRITORIAL. Satélites de Monitoramento. Campinas, 2018. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento> >. Acesso em: 5 mar. 2025

FERNÁNDEZ GARCÍA, F. **Manual de climatologia aplicada: clima, medio ambiente y planificación**. Madrid: Síntesis, 1996.

FERREIRA, M. C. **Iniciação à análise geoespacial: teoria, técnicas e exemplos para geoprocessamento**. São Paulo: Ed. UNESP, 2014.

FOISSARD, X. **L'îlot de chaleur urbain et le changement climatique: application à l'agglomération rennaise**. 2015. Tese (Thèse de doctorat en Géographie). Université Rennes 2 Haute-Bretagne, Rennes, França.

FREITAS, J. C. P.; ORTIZ PORANGABA, G. F.; SILVA, M. H. S. A evolução das ilhas de calor noturnas em Três Lagoas/MS no período de fevereiro a junho de 2019. **Confins (Paris)**, v. 63, p. 1, 2024.

GARTLAND, L. **Ilhas de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas**. São Paulo: Oficina de textos, 2010.

GATTO, E.; IPPOLITO, F.; RISPOLI, G.; OLIVER, S. C.; SANTIAGO, J. L.; AARREVAARA, E.; ROHINTON, E.; BUCCOLIERI, R. Analysis of Urban Greening Scenarios for Improving Outdoor Thermal Comfort in Neighbourhoods of Lecce (Southern Italy). **Climate**, v. 9, p. 1-19, 2021.

GOMES, W. P. **Características da temperatura na zona costeira: análise do clima urbano em Ubatuba-SP**. 2017. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente.

HUANG, F.; ZHAN, W.; VOOGT, J.; HU, L.; WANG, Z.; QUAN, J.; JU, W.; GUO, Z. Temporal upscaling of surface urban heat island by incorporating an annual temperature cycle model: A tale of two cities. **Remote Sens. Environ.**, v. 186, p. 1-12, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Presidente Venceslau. [2022]. **Censo demográfico 2022**. Sinopse. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/presidente-venceslau/panorama>. Acesso em: 18 fev. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (BRASIL). Presidente Venceslau, São Paulo. São José dos Campos: INPE, 2017. **Banco de dados geomorfométricos. Imagem SRTM Topodata**. Quadrícula 21S525. Lat. -21°87'44"S, Long. -51°84'83.17"W. Disponível em: <http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>. Acesso em: 15 maio 2017.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: Ed. UNESP, 1998.

LANDSBERG, H. E. **The Urban Climate**. Academic, 1981.

LAUWET, D.; MAIHEU, B.; DE RIDDER, K.; BOËNNE, W.; HOOYBERGHS, H.; DEMUZERE, M.; VERDONCK, M. L. A New Method to Assess Fine-Scale Outdoor Thermal Comfort for Urban Agglomerations. **Climate**, v. 8, n. 6, p. 1-13, 2020.

MELLO, V. R.; UGEDA JÚNIOR, J. C. Clima urbano em Campo Novo do Parecis-MT através de transecto móvel. **Observatorium: Revista Eletrônica de Geografia**, v. 15, p. 476-495, 2024.

MENDONÇA, M. **A dinâmica têmporo-espacial do clima subtropical na região conurbada de Florianópolis/SC**. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

MILANI, T. S. **Ilhas de calor e conforto térmico em conjuntos habitacionais construídos pela Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano (CDHU) em Martinópolis-SP (Brasil)**. Dissertação (mestrado em Geografia) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2022.

MONTEIRO, C. A. de F. **Análise Rítmica em Climatologia: problemas da atualidade climática em São Paulo e achegas para um programa de trabalho**. São Paulo: IGEOG/USP, 1971.

MONTEIRO, C. A. de F. **Teoria e clima urbano**. São Paulo: IGEOG/USP, 1976.

MOREIRA, J. L. **A ilha de calor como indicador de qualidade ambiental em Penápolis (SP)**. Tese (doutorado em Geografia) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2021.

NUNES, J. O. R.; AMORIM, M. C. C. T.; TEIXEIRA, D. C. F.; FIRMINO, G. V. A influência das formas de relevo e do uso e ocupação da terra na formação de ilhas de calor na cidade de Presidente Prudente, SP, Brasil. In: AMORIM, M.C.T.; DUBREUIL, V. (Org.). *Cidades, clima e vegetação: modelagem e políticas públicas ambientais*. 1ed. Porto Alegre: Totalbooks, 2024, v. p. 44-58.

OKE, T. **Boundary Layer Climates**. 2. ed. London: Methuen & Ltd. A. Halsted Press Book, John Wiley & Sons, New York, 1987.

OKE, T. R. Siting and exposure of meteorological Instruments at urban sites. In: **NATO/CCMS International Technical Meeting on air Pollution Modelling and its Application**, 27., 2004, Canadá: Banff, p. 1-14. Disponível em: <http://urban-climate.com/ITM04-Oke.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2016.

OKE, T. R.; MILLS, G.; CHRISTEN, A.; VOOGT, J. **Urban climates**. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.

ORTIZ PORANGABA, G. F.; TEIXEIRA, D. C. F.; AMORIM, M. C. C. T. Procedimentos metodológicos para análise da ilha de calor em cidades de pequeno e médio porte. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, p. 225-247, 2017.

ORTIZ, G. F.; GALVANI, E.; AMORIM, M. C. C. T. Ilhas de calor superficiais e ondas de calor em Três Lagoas, MS: análise pela ótica do risco e da vulnerabilidade socioambiental. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 35, p. 275-296, 2024.

ROMANO, P.; PRATAVIERA, E.; CARNIELETTO, L.; VIVIAN, J.; ZINZI, M.; ZARRELLA, A. Assessment of the Urban Heat Island Impact on Building Energy Performance at District Level with the EURECA Platform. **Climate**, v. 9, n. 48, p. 1-23, 2021.

SANT'ANNA NETO, J. L. Escalas Geográficas do Clima. In: AMORIM, M. C. C. T.; SANT'ANNA NETO, J. L.; MONTEIRO, A. **Climatologia Urbana e Regional**. São Paulo: Outras Expressões, 2013.

SANT'ANNA NETO, J. L.; ZAVATINI, J. A. (org.). **Variabilidade e Mudanças Climáticas: implicações ambientais e socioeconômicas**. Maringá: Eduem, 2000.

SILVA, G. H. P. da. **Tendências e ocorrências de episódios extremos climáticos em Presidente Prudente (SP)**. Tese (doutorado em Geografia) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2024.

TEIXEIRA, D. C. F. **O clima urbano das cidades do Oeste Paulista: análise do perfil térmico de Presidente Venceslau, Santo Anastácio e Álvares Machado, Brasil**. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2019. 238 p.

TEIXEIRA, D. C. F.; AMORIM, M. C. C. T. O estudo da ilha de calor em cidade de pequeno porte: algumas contribuições. **Sociedade & Natureza** (UFU. ONLINE), v. 30, p. 186-209, 2018.

TEIXEIRA, D. C. F.; AMORIM, M. C. C. T.; DUBREUIL, V. Modelagem da ilha de calor para cidade pequena (Rancharia-SP) a partir de imagens do satélite Landsat 7 e de medidas de temperatura do ar. In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2015, João Pessoa, **Anais** [...] João Pessoa, 2015. p. 1-8.

TEIXEIRA, D. C. F.; AMORIM, M. Modelagem espacial da temperatura do ar em cidade de pequeno porte: o exemplo de Presidente Venceslau (SP). In: Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, 13, 2018, Juiz de Fora: **Anais** [...] A Climatologia Geográfica Brasileira: o ensino, os métodos, as técnicas e os desafios para o século XXI. Juiz de Fora: UFJF, 2018. p. 2158-2167.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Presidente Venceslau, São Paulo. [Reston]: USGS, 2017. 1 imagem de satélite. Satélite Landsat 8, instrumento OLI TIRS. Ponto 223, órbita 075. Intervalo de tempo: de 01 abr. 2017 a 10 out. 2017. Lat. - 21°87'44"S, Long. -51°84'83.17"W. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 22 mar. 2018.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Processo Fapesp N° 2015/26224-8).

Recebido em: fevereiro de 2023
Aceito em: março de 2025