

Avaliação do *Urban Weather Generator* em uma fração urbana de Curitiba/PR

Evaluation of Urban Weather Gerenerator for a small urban area of Curitiba/PR

Cristiane Rossatto Candido(1); Francine Aidie Rossi(2)

1 Mestre em Engenharia Civil (UFPR), Engenheira Civil.

E-mail: rossattoc@gmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3178-7796>

2 Doutora em Tecnologia e Sociedade (UTFPR), Arquitetura e Urbanista, Docente DEGRAE, Universidade Federal do Paraná.

E-mail: rossi@ufpr.br | ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0745-5684>

Revista de Arquitetura IMED, Passo Fundo, vol. 14, n. 1, p. 93-112, janeiro-junho, 2025 - ISSN 2318-1109

DOI: <https://doi.org/10.18256/2318-1109.2025.v14i1.5044>

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*

Resumo

A formação do microclima urbano é influenciada por diversos fatores, como ilhas de calor, fluxo de ventos, trocas de radiação em espaços urbanos, sendo esses fatores são pouco considerados nas simulações térmicas e energéticas das edificações pelo processo de balanço de energia ou *Building energy modelling* (BEM). O objetivo dessa pesquisa é avaliar a simulação microclimática do UWG em uma fração urbana de Curitiba/PR, a partir de dados climáticos de duas estações meteorológicas de Curitiba/PR e da análise comparativa de valores médios de temperatura do ar. Para a geração do arquivo UWG foi considerada as características do entorno urbano na área escolhida. Foi utilizado o algoritmo de geração de dados climáticos *Urban Weather Generator* (UWG) para elaboração de um arquivo climático epw correspondente as características urbanas do entorno do campus Centro Politécnico, da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Para tanto, foram realizadas análises como uso e ocupação do solo, além da composição do entorno urbano com as variáveis de albedo e absorptância das superfícies, calor antropogênico, características das edificações do entorno. Os resultados demonstraram que o UWG foi capaz de caracterizar o comportamento da variável de temperatura do ar para o entorno do campus da UFPR.

Palavras-chave: *Urban Weather Generator*; Temperatura do ar; entorno urbano.

Abstract

The climatic formation of cities is a particular system and is causally related to the urban environment. The objective of this research is to evaluate the microclimatic simulation of UWG in a small urban area in Curitiba/PR from climatic data of two official meteorological stations of Curitiba/PR and the comparative analyses of mean values of air temperature. For the UWG simulation it was considered the urban parameters of the chosen area. The Urban Weather Generator (UWG) climatic data generation algorithm it was used to prepare an epw climate file corresponding to the urban characteristics surrounding the Centro Politécnico campus, at the Federal University of Paraná (UFPR). For this purpose, analyzes such as land use and occupation were carried out, in addition to the composition of the urban environment with the variables of albedo and surface absorption, anthropogenic heat, characteristics of the surrounding buildings. The results showed that the UWG was able to characterize the behavior of the air temperature variable around the UFPR campus.

Keywords: Urban Weather Generator; Air Temperature; Urban Surroundings.

1 Introdução

Devido ao aumento populacional nas cidades são verificadas mudanças no uso e ocupação do solo, sendo este um dos fatores que influenciam o efeito da ilha de calor, que acaba por aumentar as temperaturas no meio urbano (Oke, 1987). Esse aumento de temperatura pode levar a um acréscimo considerável no consumo de energia no edifício para resfriamento. Por isso, torna-se recomendável o uso de estratégias bioclimáticas que visem a atenuação do microclima e, conseqüentemente, do consumo de energia.

Uma forma de avaliar essas estratégias bioclimáticas é pelo uso de simulações termo energéticas de edificações. A maioria dos estudos nesse campo usam programas de simulação baseados em modelos de balanço de energia. Esses softwares apresentam resultados satisfatórios, porém não contemplam as peculiaridades do microclima urbano. Dentre esses efeitos está o aumento da temperatura do ar, resultado da densificação urbana, da diminuição de áreas verdes e permeáveis, entre outros.

Além disso, os arquivos climáticos utilizados na simulação são de dados provenientes de estações meteorológicas rurais e baseados em anos climáticos típicos (anos com condições climáticas médias). O que gera valores de cargas térmicas e de temperaturas do ar internas não tão precisas nos resultados de simulações, pois desconsidera os efeitos da ocupação urbana no entorno da edificação. Além disso, os dados de arquivos climáticos não são atualizados periodicamente, sendo assim, as mudanças climáticas que acontecem ao longo dos anos, acabam não sendo consideradas.

Algumas alternativas para avaliar o efeito da microescala urbana no comportamento térmico e energético das edificações foram desenvolvidos. Um exemplo desses métodos é o uso de simulações baseada em dinâmica dos fluidos, do inglês, *Computational Fluid Dynamics* (CFD) e outro é o *Urban Weather Generator* (UWG) que considera as características do entorno urbano na geração de um arquivo climático, que pode ser utilizado em simulações de desempenho energético de edificações.

Esse algoritmo faz a alteração das variáveis de temperatura e umidade do ar de um arquivo climático, do tipo epw, utilizado em simulação de desempenho de edificações. As variações que o algoritmo sugere das variáveis climáticas são resultado das informações de entrada, em relação ao entorno urbano da edificação em análise ou de uma estação meteorológica urbana (Salvati; Roura; Cecere, 2016; Chiesa; Palme, 2018).

Um dos benefícios do UWG é que o modelo gera resultados que colaboram com as pesquisas com a técnica CFD, sem a necessidade de um computador com configurações de alto desempenho e demanda menos tempo de simulação que uma simulação computacional por CFD (Salvati; Roura; Cecere, 2016). Nakano (2015) afirma que o UWG apresenta desempenho satisfatório para todas as condições climáticas e para diferentes localidades. Tendo sido validado para diferentes contextos

urbanos e climáticos, como: Toulouse e Basel (Suíça) (Bueno *et al.*, 2012), Singapura (Bueno *et al.*, 2014), Boston (Nakano, 2015), Roma e Barcelona (Salvati; Roura, Cecere, 2016), Abu Dabi (Bande *et al.*, 2019) e Mendoza e Campinas (Alchapar *et al.*, 2029).

Lima, Scalco e Lamberts (2019) e Machado (2019) estudaram, com uso do UWG, a influência da radiação solar no clima urbano e o efeito desse na carga térmica de edifícios comerciais em duas cidades do Brasil, o primeiro em Maceió/AL e o segundo em Santa Maria/RS. Os resultados de Lima, Scalco e Lamberts (2019) demonstraram que houve uma redução de carga para resfriamento de 16% a 18%, quando considerado uma geometria urbana que recebe sombreamento, para o clima de Maceió. Já Machado (2019) demonstrou que a ilha de calor em Santa Maria resulta em um aumento percentual de 5% a 59% da carga térmica para resfriamento.

Em estudo, Salvati *et al.* (2020) analisaram a performance energética de diferentes edifícios quando considerados fenômenos climáticos como a ilha de calor e obstrução solar em 10 casos de estudo diferentes, em Roma, na Itália e em Antofagasta no Chile. Os resultados mostraram que as sombras urbanas são fundamentais para redução do consumo de energia para resfriamento em climas quentes e que o efeito da ilha de calor é mais significativo para climas temperados.

Dessa forma, o uso do arquivo climático modificado considerando o entorno em que a edificação está inserida, pode auxiliar na obtenção de resultados térmicos e energéticos mais fiéis à realidade. Possibilitando a intervenção com medidas mais eficazes na diminuição do consumo de energia. O aprimoramento das análises termo energéticas de edificações, considerando o contexto urbano na qual ela será inserida, pode gerar dados que auxiliem a tomada de decisões projetuais e resultar em menor consumo de energia para climatização.

2 Objetivo

O objetivo dessa pesquisa é avaliar a simulação microclimática do UWG em uma fração urbana de Curitiba/PR, a partir de dados climáticos de duas estações meteorológicas de Curitiba/PR e da análise comparativa de valores médios de temperatura do ar.

3 Método

A abordagem dessa pesquisa é exploratória do tipo quantitativa. Foram analisados dados de temperatura do ar a partir de duas estações meteorológicas oficiais de Curitiba/PR, considerando a influência do entorno urbano no microclima.

Para a análise da influência do entorno urbano, foram selecionados dois recortes espaciais referente à estação meteorológica do SIMEPAR (entorno urbano), localizada

no Centro Politécnico da UFPR e a estação meteorológica do Aeroporto Internacional Afonso Pena, considerado como zona rural.

A estação meteorológica do SIMEPAR foi utilizada como referência de dados para comparação com os valores gerados pelo programa UWG, com a intenção de validar o arquivo climático modificado.

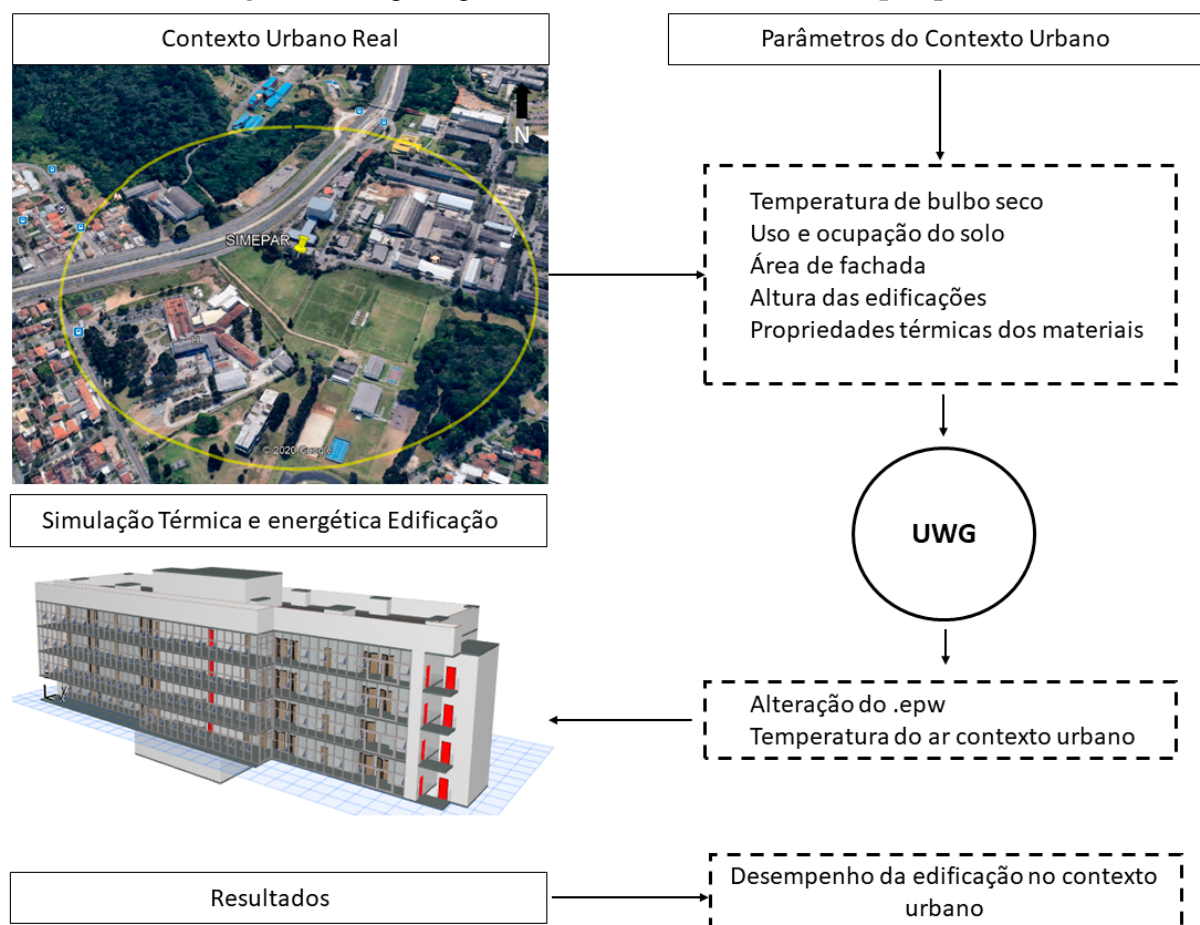
Para avaliação da temperatura interna da edificação e do consumo energético selecionou-se o edifício de consórcio de laboratórios, localizado no Centro Politécnico da UFPR. Esse edifício está dentro do mesmo contexto urbano que estação meteorológica do SIMEPAR, permitindo a comparação dos dados meteorológicos reais com os dados gerado pelo algoritmo UWG e os resultados das simulações estão em Candido (2020) e Candido e Rossi (2024).

No mapa mental da Figura 1 são apresentados o contexto analisado, os parâmetros utilizados e a finalidade de uso do arquivo climático modificado.

O método está dividido em duas etapas:

1. Análise comparativa da temperatura de bulbo seco entre uma estação meteorológica urbana (SIMEPAR) e uma rural (Aeroporto Afonso Pena);
2. Desenvolvimento do arquivo climático utilizando o UWG.

Figura 1. Organograma de desenvolvimento da pesquisa



Fonte: Candido (2020).

Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, Curitiba possui clima temperado marítimo úmido (Cfb) (Peel; Finlayson; McMahon, 2007), caracterizado por alta pluviosidade e por temperaturas amenas. Além disso, segundo o zoneamento bioclimático brasileiro a cidade se enquadra na Zona Bioclimática 1 (ABNT, 2003), sendo a capital mais fria do país. A temperatura média anual é 19,7 °C e os meses mais quentes variam entre janeiro e fevereiro e os mais frios entre junho e julho.

3.1 Análise comparativa de temperatura do ar entre duas estações meteorológicas oficiais

A análise comparativa foi realizada aplicando o método do ano climático de referência (TRY), desenvolvido pela ASHRAE. Foram feitas comparações dos dados TRY obtidos a partir dos dados climáticos das estações meteorológicas do SIMEPAR e do Aeroporto Afonso Pena.

Foram comparados os dados do: (1) TRY obtido por Rossi, Dumke e Krüger (2009) com o TRY atualizado a partir dos dados da estação do SIMEPAR; (2) TRY obtido por Goulart, Lamberts, Firmino (1998) e atualizados por Roriz (2012) da estação do Aeroporto Afonso Pena e (3) TRY obtidos a partir estações SIMEPAR e Aeroporto para o período de 2002 a 2016.

As comparações mostraram que há diferença significativas nos dados climáticos ao longo do período analisado. Para os dados climáticos do Aeroporto Afonso Pena, o TRY resultante foi do ano de 2013. E para os dados provenientes do SIMEPAR, o TRY resultou no ano de 2008. Os procedimentos detalhados dessa etapa estão em Candido e Rossi (2019).

Nessa pesquisa será utilizado o TRY de 2008, correspondente aos dados do SIMEPAR.

3.2 Desenvolvimento do arquivo climático usando o UWG

A primeira etapa da pesquisa consistiu em alterar o arquivo climático epw de Curitiba com o auxílio do software UWG. O objetivo dessa etapa foi verificar a influência do entorno urbano na variável de temperatura de bulbo seco. O UWG lê um arquivo de entrada em linguagem xml com informações da área urbana analisada, isto é, do entorno urbano da sede urbana do SIMEPAR (Figura 2A), que está localizada à aproximadamente 600 metros da edificação analisada. Na Figura 2B está apresentado o entorno da estação meteorológica do Aeroporto Afonso Pena considerada uma estação de referência em área rural. De acordo com Oke (2004), Salvati, Roura e Cecere (2016) e Salvati et al (2020), foi definido um raio de 350 metros de influência nas duas áreas, tendo como centro as estações meteorológicas (círculos vermelhos da Figura 2). Do entorno urbano (SIMEPAR) e da área rural (Aeroporto) foram extraídos os índices urbanos necessários para compor o arquivo de entrada do UWG.

Figura 2. Foto aérea das áreas do entorno das estações meteorológicas do SIMEPAR (A) e do Aeroporto Afonso Pena (B)



Fonte: Candido (2020)

3.2.1 Uso e Ocupação do solo

Para a classificação do solo, foram definidos quatro usos: asfalto, área construída (taxa de ocupação das edificações), vegetação arbórea e vegetação rasteira. Para inserção desses dados no UWG foi necessário obter as porcentagens de cada uso.

Para tal, foram utilizadas imagens Sentinel-2, o programa de Sistemas de Informação Geográficas (SIG) QGIS e, acoplado a esse último, o *plug-in Semi-automatic Classification* (SCP), responsável pela classificação do solo.

Foram utilizadas as imagens de satélite Sentinel-2 para obter a classificação do uso do solo. O sensor desse satélite é multiespectral optoeletrônico, tendo resolução de 10 a 60 metros, nas zonas espectrais infravermelho de onda curta, infravermelho próximo e visível. Esse sensor tem 13 canais espectrais, que permite a captura de diferenças na vegetação, incluindo alterações temporais, e minimiza o impacto na qualidade de fotografias da atmosfera (EOS, 2015). As diferentes bandas das imagens Sentinel-2 e suas especificidades podem ser visualizadas na Tabela 1. Para esse estudo, foram utilizadas as imagens com bandas de resolução de 10 metros¹, devido o raio de estudo ser pequeno, 350 metros. Dessa forma, as bandas utilizadas foram as bandas 2, 3, 4 e 8. Buscou-se conjuntos de dados com céu limpo, com cobertura de nuvens sendo inferior a 10%. As imagens são Level-2A, referentes a refletância de superfície (Congedo, 2020).

1 As imagens do satélite Sentinel-2 são disponibilizadas gratuitamente pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) e estão disponíveis no site *EarthExplorer* (www.earthexplorer.usgs.gov/). As imagens utilizadas são datadas de 24 de junho de 2019, como pode ser verificado no ID:L1C_T22JFS_A020913_20190624T132237.

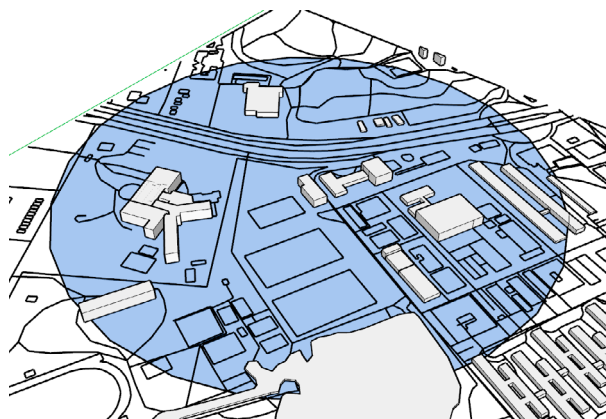
Tabela 1. Bandas das imagens Sentinel-2

Banda	Comprimento de onda (μm)	Resolução (m)
Banda 1 – Aerossol Costeiro	0.443	60
Banda 2 – Azul	0.490	10
Banda 3 - Verde	0.56	10
Banda 4 – Vermelho	0.665	10
Banda 5 – Red Edge 1	0.705	20
Banda 6 – Red Edge 2	0.740	20
Banda 7 Red Edge 3	0.783	20
Banda 8 – infravermelho Próximo (NIR)	0.842	10
Banda 8A – Red Edge 4	0.865	20
Banda 9 – Vapor de Água	0.945	60
Banda 10 – Cirrus	1.375	60
Banda 11 – SWIR	1.610	20
Banda 12 - SWIR	2.190	20

Fonte: Adaptado de Congedo (2020).

Após a abertura das bandas de imagem no programa QGIS, foi realizada a correção de subtração de objetos escuros, indicada por Chávez (1996, apud Congedo, 2020 p. 132) que explica que “a correção se faz necessária devido ao fato de que alguns dos pixels, nas imagens, estarão em sombra completa, e a radiações recebidas (visualizadas na imagem), são resultado das dispersões atmosféricas.”

A classificação do solo foi realizada a partir do plug in SCP (*Semi-automatic Classification*), acoplado ao QGIS. Assim, foi possível identificar os materiais nas imagens, com base nas diferentes bandas da imagem (assinaturas espectrais). O procedimento detalhado está descrito em Candido (2020). A Figura 3 apresenta a área do entorno urbano de onde foram obtidas as variáveis urbanas.

Figura 3. Circunferência do entorno urbano do SIMEPAR

Fonte: Adaptado de CADMAPPER (2020).

A taxa de área construída, a altura média das edificações e a taxa de área da fachada (Tabela 2) foram obtidas a partir da geometria urbana fornecida pelo site CADMAPPER².

Tabela 2. Parâmetros de taxa de ocupação, altura média das edificações e taxa de área de fachada

Parâmetro	Valores obtidos
Área total de edificações	164238,8 m ²
Taxa de área construída	43%
Número de edificações	67 unidades
Altura Média	6,8 m
Área de fachada	50737,35 m ²
Taxa de área de fachada	13%

Fonte: Candido (2020).

3.2.2 Elaboração do arquivo de entrada no UWG

O UWG transforma dados meteorológicos do arquivo climático padrão (epw), usado em simulações térmica energéticas de edificações, em um arquivo epw referente às condições climáticas de um entorno urbano específico (Bueno, 2010). Para desenvolvimento desse estudo foi utilizada a versão V4 do programa, sem interface gráfica. Dessa forma, foi elaborado um arquivo de dados de entrada, em xml, com as informações da área urbana estudada (SIMEPAR) e do entorno da estação meteorológica de referência (Aeroporto Afonso Pena)³.

O algoritmo do UWG é baseado na teoria de modelos de dossel urbano e balanço de energia de edificações (Bueno, 2010; Machado, 2019; Salvati *et al.*, 2020). O modelo consiste em quatro diferentes componentes de cálculo, sendo: (1) Modelo da estação rural; (2) Modelo de difusão vertical, (3) Modelo da camada limite e; (4) Modelo de dossel urbano e de balanço de energia de edificações (Salvati; Roura; Cecere, 2016).

Na Tabela 3 estão apresentados os valores de entrada utilizados no arquivo de programação do UWG. Na última coluna da tabela são apresentadas as fontes das quais foram retirados os valores utilizados na pesquisa. Os valores de taxa de vegetação arbórea e rasteira, taxa de área construída, taxa de asfalto, taxa de área de fachada e altura das edificações, foram obtidas por meio dos procedimentos descritos nas seções anteriores.

2 Aplicativo online que transforma dados geográficos provenientes de fontes públicas como *OpenStreetMap* e NASA, em arquivos CAD e de programas 3D como SketchUp, disponível em: <https://cadmapper.com/>

3 Dados climáticos do arquivo SWERA 838400, disponível em: https://www.energyplus.net/weather-location/south_america_wmo_region_3/BRA//BRA_Curitiba-Afonso.Pen.838400_SWERA

Tabela 3. Parâmetros de entrada no UWG

	Parâmetro	Valor utilizado	Unidade	Referência
Área Urbana	Calor antropogênico rua	10.79	W/m ²	Callejas (2012); Ferreira, Oliveira, Soares (2010)
	Emissividade asfalto	0.92		Oke (1988)
	Albedo asfalto	0.3		Oke (1988)
	Albedo vegetação rasteira	0.16		Angelini <i>et al.</i> (2015)
	Albedo vegetação densa	0.12		Angelini <i>et al.</i> (2015)
	Taxa vegetação arbórea	0.17672	% decimal	Calculado SCP
	Taxa vegetação rasteira	0.28054	% decimal	Calculado SCP
	Taxa área construída	0.43	% decimal	Calculado
	Taxa asfalto	0.11	% decimal	Calculado
	Taxa área de fachada	0.13	% decimal	Calculado
Telhado	Altura média edificações	6.8	m	Calculado
	Emissividade telhado laje concreto	0.87		Muniz-Gaal <i>et al.</i> (2018)
	Albedo laje concreto escuro	0.21		Muniz-Gaal <i>et al.</i> (2018)
	Condutividade térmica	1.78	W/mk	Calculado base 15220 (BRASIL, 2003)
	Inercia Térmica	1753.13	kJ/m ³ K	Calculado base Aldawi 2013
	Espessura	0.32	m	Estimado
	Vegetação	0		Estimado
	Inclinação	0.08	unidade	Estimado
Parede	Temperatura inicial	20	°C	Default programa
	Emissividade	0.92		Oke (1988)
	Albedo	0.4		Oke (1988)
	Condutividade térmica	1.18	W/mK	Calculado ABNT NBR 15220 (BRASIL, 2003)
	Inercia Térmica	1120	kJ/m ³ K	Calculado base Aldawi (2013)
	Espessura	0.15	m	Estimado
	Vegetação	0		Default programa
	Inclinação	0		Default programa
	Temperatura inicial	20	°C	Default programa
	Albedo	0.4		Oke (1988)
Vidro	Condutividade térmica	1.18	W/mK	Calculado ABNT NBR 15220 (BRASIL, 2003)
	Inercia Térmica	1120	kJ/m ³ K	Calculado base Aldawi (2013)
	Espessura	0.15	m	Estimado
Área Rural	Vegetação	0		Default programa
	Inclinação	0		Default programa
	Temperatura inicial	20	°C	Default programa
	Taxa de vegetação rasteira	0.72	% decimal	Calculado

Fonte: Candido (2020).

3.2.3 Tratamento de dados

Os dados foram obtidos de duas formas. Primeiro, foram revisados os valores médios de temperatura de bulbo seco para as diferentes fontes de dados, sendo eles: (1) arquivo climático SWERA 838400 (Aeroporto), (2) arquivo climático modificado pelo UWG e (3) dados de medição da estação meteorológica do SIMEPAR, para o ano de 2008 (Candido; Rossi, 2019). Foram selecionados os meses que apresentaram maior e menor valores médios de temperatura do ar, respectivamente fevereiro e junho. A partir da seleção, foram obtidas as médias horárias de temperatura do ar para os referidos meses.

O teste t foi utilizado para verificar a relação entre os dados médios de temperatura do ar do arquivo climático gerado pelo UWG e os provenientes da estação meteorológica do aeroporto (SWERA 838400). Foram testados os valores horários médios das 8760 horas. Calculou-se o valor P, que indica se a hipótese nula é verdadeira ou não. Quando os valores de P são altos é um indicativo de que os dados representam um nulo verdadeiro (Costa Neto, 2002). Já quando P é um valor baixo é improvável que a hipótese nula seja verdadeira.

No caso, analisou-se a hipótese nula de que os dados horários médios de temperatura do ar registrados pelo aeroporto (SWERA) são iguais aos dados médios de temperatura do ar gerados pelo algoritmo UWG, para o nível de confiança de 5%.

3.3 Apresentação e discussão dos resultados

Inicialmente serão apresentados os resultados da classificação do uso do solo e a correção de dados da taxa de área construída. E depois, as análises das diferenças de temperatura de bulbo seco para os dados do arquivo climático SWERA, do arquivo climático modificado pelo UWG e os dados provenientes da estação meteorológica do SIMEPAR, no ano climático típico de 2008.

3.3.1 Dados de uso e ocupação do solo

Os mapas com os dados de uso e ocupação do solo foram feitos no programa QGIS.

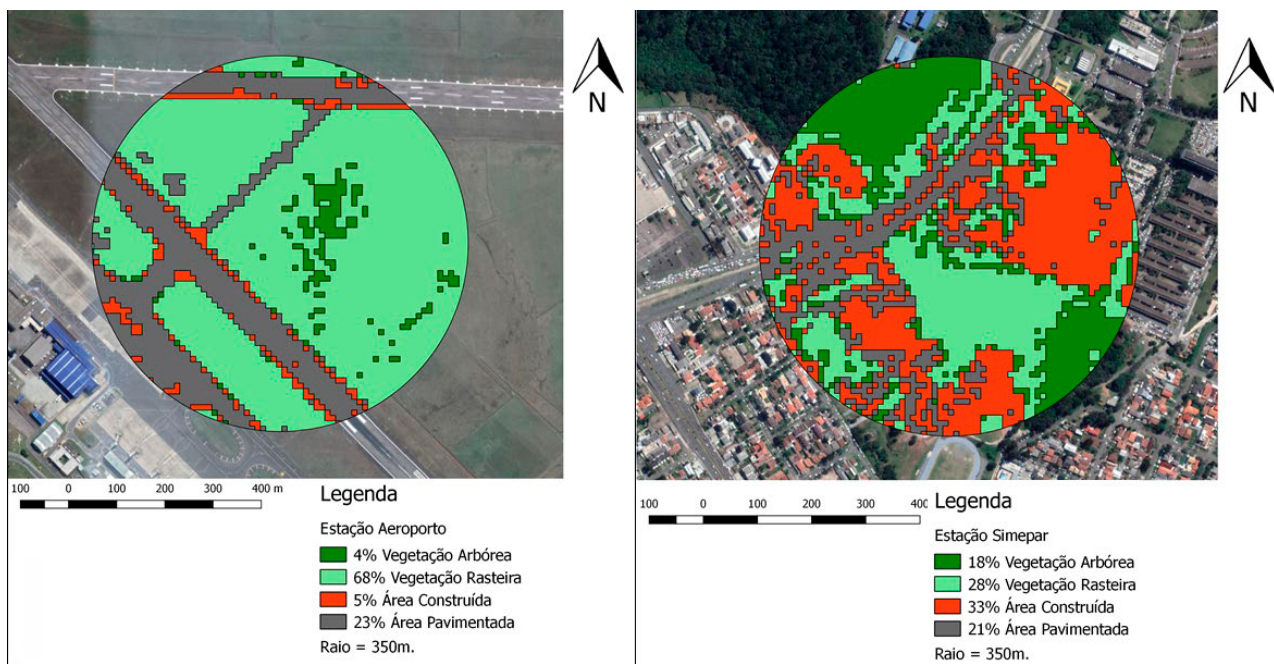
A Figura 4A apresenta os resultados para o entorno da estação meteorológica do Aeroporto Afonso Pena, no qual as taxas de diferentes usos do solo foram calculadas a partir das áreas obtidas pela tabela de atributos do polígono. Verificou-se que para o raio de 350 metros a maior porção do solo é composta por vegetação rasteira (68%), o segundo uso evidenciado é a área pavimentada (23%) e as duas ocupações menos significativas nesse raio, foram vegetação arbórea (4%) e área construída (5%).

Já a Figura 4B apresenta o resultado para o entorno urbano da estação meteorológica do SIMEPAR, no campus Centro Politécnico da Universidade Federal

do Paraná. Nessa classificação do solo, os resultados obtidos para vegetação arbórea e rasteira foram, respectivamente, 18% e 28%, o que já era esperado, devido parte do entorno ser composto pela reserva de mata da UFPR e por boa parte do campus Centro Politécnico e Jardim Botânico. Os índices de área construída e área pavimentada, nesse caso, não tiveram resultados satisfatórios, devido ao tamanho dos pixels das imagens de satélite utilizadas. Dessa forma, foi necessário a realização de uma correção desses dados.

Para correção dos dados de área construída e pavimentada foram utilizados os dados disponibilizados no site CADMAPPER, os valores utilizados foram: área construída com taxa de 43% e área pavimentada com taxa de 11%.

Figura 4. Mapa do uso do solo no entorno da (A) estação meteorológica do Aeroporto Afonso Pena e da (B) estação meteorológica do SIMEPAR



Fonte: Candido (2020), elaborado a partir de imagem Sentinel-2.

3.3.2 Dados de temperatura de bulbo seco

A hipótese nula testada pelo teste t foi de que os valores médios da temperatura do ar registrados pelo aeroporto (SWERA) são iguais aos dados médios de temperatura do ar gerados pelo UWG. O valor de P encontrado foi de 0 (zero), indicando que a hipótese nula não é verdadeira, ou seja, os dados do arquivo SWERA são diferentes dos dados gerados pelo UWG (Tabela 4).

Tabela 4. Teste t para os dados SWERA e UWG

	Ta SWERA	Ta UWG
Média	17,171	18,291
Variância	25,449	22,387
Observações	8760	8760
Correlação de Pearson	0,934	
Hipótese da diferença de média	0,000	
gl	8759	
Stat t	-57,964	
P(T<=t) uni-caudal	0,000	
t crítico uni-caudal	1,645	
P(T<=t) bi-caudal	0,000	
t crítico bi-caudal	1,960	

Fonte: Candido (2020).

Os resultados de temperatura média mensal de temperatura do ar são apresentados na Tabela 5. Esses dados mensais foram utilizados para avaliar quais seriam os meses mais críticos (mais quente e mais frio) em relação à temperatura de bulbo seco. Dessa forma, foi verificado que o mês com média mais quente para temperatura do ar foi fevereiro, nos três casos amostrais, e que julho foi o mês com médias mais frias, tanto no arquivo climático SWERA e dos dados provenientes da estação meteorológica do SIMEPAR. Para o arquivo climático gerado pelo *software* UWG verificou-se que as médias mais baixas foram em julho e agosto (14,55°C para os dois meses), sendo que a média em junho 15,02°C.

Tabela 5. Temperaturas de bulbo seco classificadas por cores

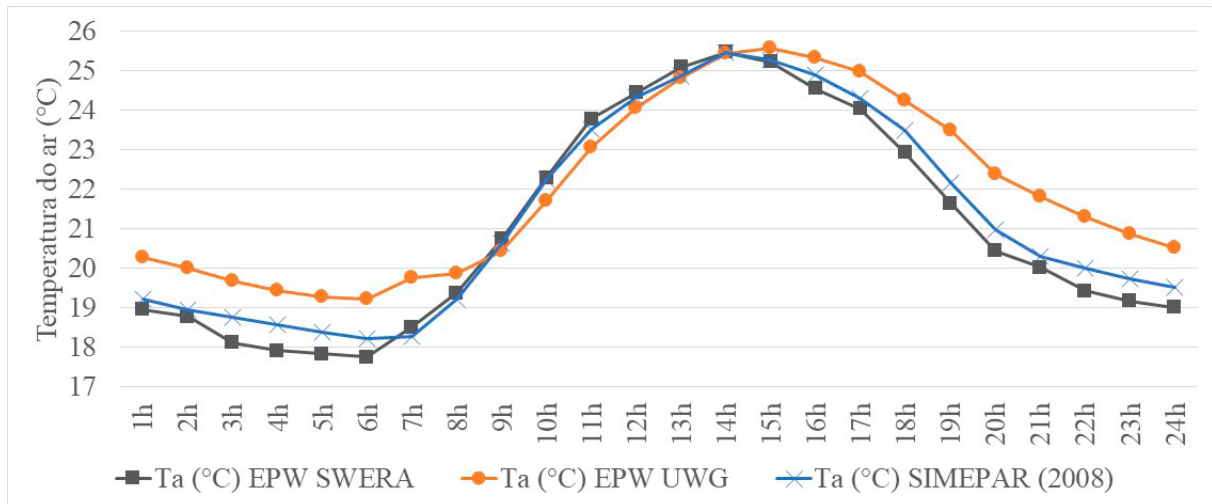
Mês	Temperatura do ar (°C)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Maio	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
EPW SWERA	20,94	21,06	20,05	18,69	14,93	13,14	13,55	13,28	15,26	16,84	18,77	19,83
EPW UWG	21,93	21,98	21,02	19,71	16,6	15,02	14,55	14,55	15,98	17,76	19,78	20,87
SIMEPAR	20,04	21,3	20,38	18,45	15,65	14,28	16,03	16,36	15,16	18,15	18,49	20,01

Fonte: Candido (2020).

A partir dos dados da Tabela 4, foram selecionados os meses mais frio e mais quente, para comparar as diferenças encontradas entre as três fontes de dados avaliadas. Na Figura 5 estão apresentadas as médias horárias de temperatura de bulbo seco para o mês de fevereiro. A variação de temperatura média com maior diferença foi 1,3°C para o horário das 20h. A temperatura média horária do ar mais alta ocorreu às 14h, temperatura de 25,47°C para as três fontes analisadas.

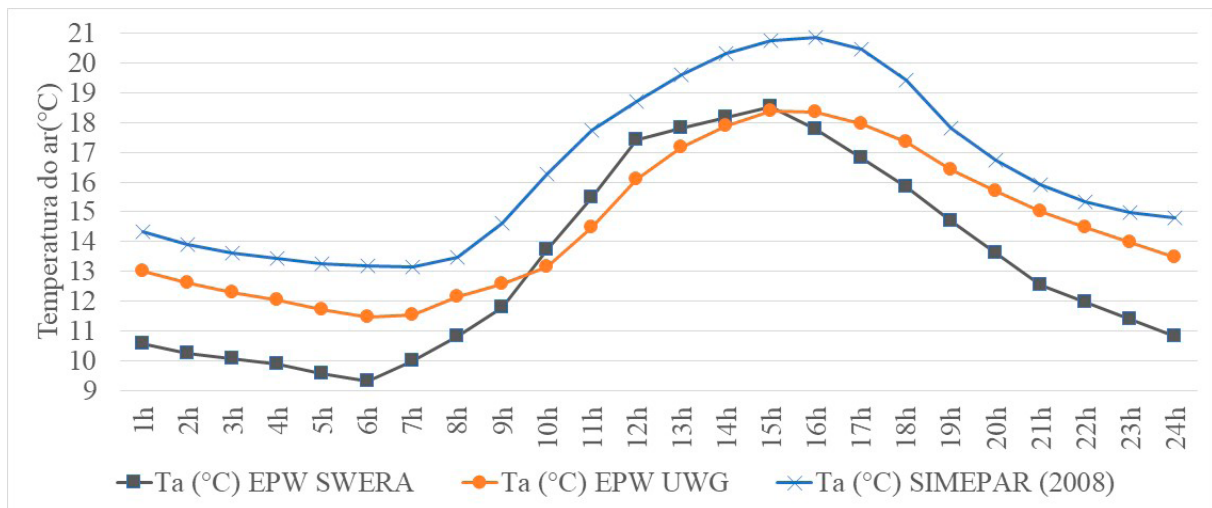
Além disso, pode-se observar que para os horários das 18h até as 8h, os valores de temperatura média do arquivo climático gerado pelo UWG ficaram mais altas, possivelmente devido a capacidade do algoritmo de prever a tendência da ilha de calor do entorno urbano, como apontado em Bueno (2010) e Salvati, Roura e Cecere (2016). Ainda, vale ressaltar que os arquivos climáticos são elaborados com dados representativos que descartam meses e anos com temperatura mais alta ou mais baixa, sendo assim tanto os dados do ano TRY do SIMEPAR quanto os dados do arquivo climático SWERA, seriam correlatos a dados típicos.

Figura 5. Média horária de temperatura de bulbo seco para o mês de fevereiro



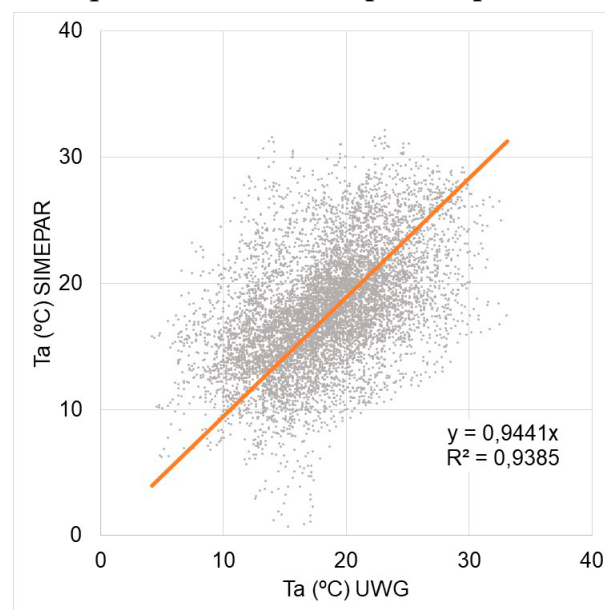
Fonte: Candido (2020).

Já para o mês de junho (Figura 6) a variação do arquivo climático UWG se mostrou maior em relação a estação meteorológica do SIMEPAR. As temperaturas horárias médias foram, respectivamente, 20,85°C e 18,35°C, para a estação meteorológica do SIMEPAR e para o arquivo climático UWG, no horário das 14h. Nesse sentido é importante avaliar que Salvati, Roura e Cecere (2016) concluíram que a medição da estação meteorológica pode ser influenciada pelas superfícies urbanas próximas ao termômetro e que apesar do UWG ser considerado uma ferramenta satisfatória para prever os efeitos da morfologia urbana nas variáveis climáticas, ele não consegue considerados parâmetros muito peculiares do entorno urbano. No caso do estudo dos autores, o programa não foi capaz de prever a influência da brisa marítima para um entorno urbano (Salvati; Roura; Cecere, 2016).

Figura 6. Média horária de temperatura de bulbo seco para o mês de junho

Fonte: Candido (2020).

A correlação entre os dados do arquivo climático SIMEPAR e UWG (Figura 7) mostra que o algoritmo UWG foi capaz de prever um aumento de temperatura no entorno urbano analisado. Apresentado alta correlação entre os dados de temperatura do ar, validando o modelo gerado pelo UWG.

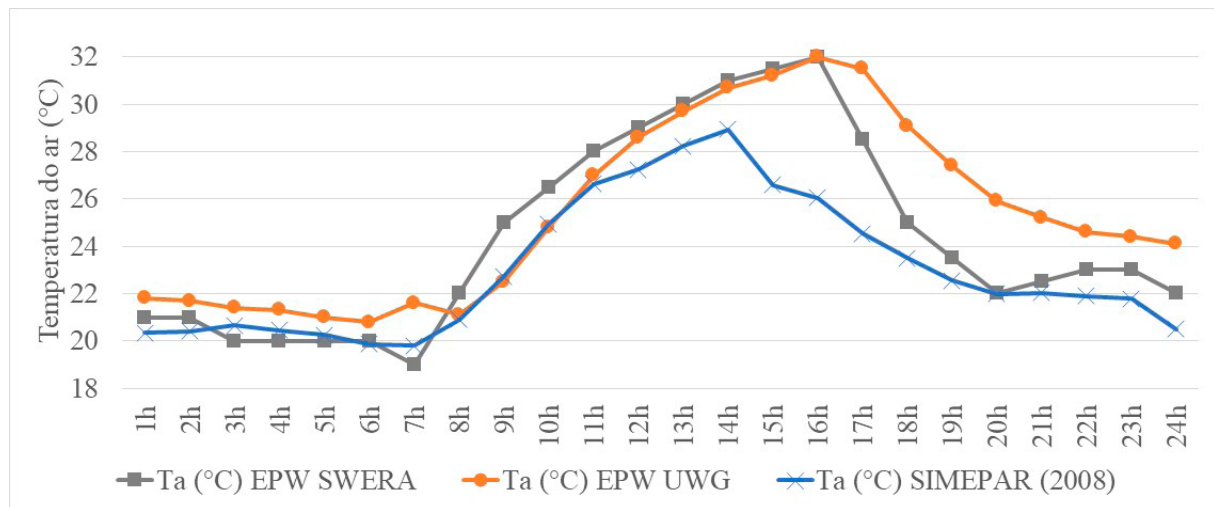
Figura 7. Correlação entre os dados de temperatura do ar do arquivo SIMEPAR e o predito pelo UWG

Fonte: As autoras (2020).

A Figura 8 representa o conjunto de dados de um dia de fevereiro (14 de fevereiro) para os arquivos climáticos SWERA, UWG e SIMEPAR. Apesar da variação entre os dados do SIMEPAR e os dados do arquivo climático UWG, é possível verificar visualmente que a tendência do comportamento da variável temperatura do ar, para Curitiba, foi representada. O aquecimento do ambiente urbano começa no início da

manhã, coincidindo com o período de incidência de radiação solar e se mantém até início da noite, quando lentamente a temperatura tende a cair.

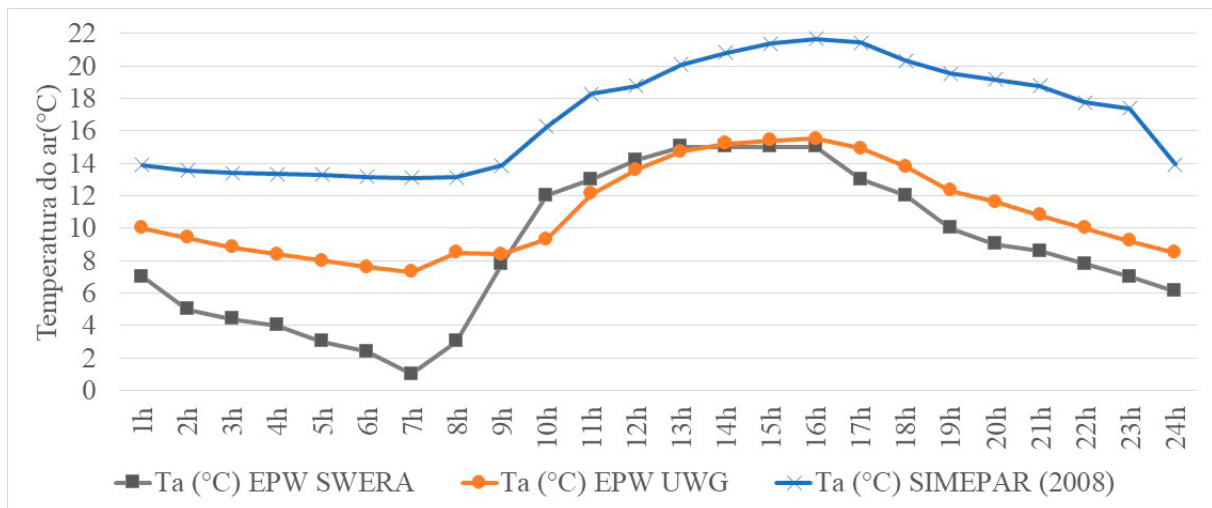
Figura 8. Dados horários de temperatura de bulbo seco para o dia 14 de fevereiro



Fonte: Candido (2020).

Os dados do SIMEPAR foram utilizados como forma de verificação do comportamento da temperatura do ar dos dados gerados pelo UWG. Ressalta-se que os dados utilizados como entrada no algoritmo UWG são de 2012, enquanto os dados do SIMEPAR se referem ao ano climático de referência 2008.

Da mesma forma, para os dados de um dia no inverno (15 de junho), é possível perceber o comportamento da temperatura do ar horária para o entorno analisado em Curitiba ao se comparar o comportamento das curvas de Ta do UWG e do SIMEPAR (Figura 9). Os valores de temperatura aumentam a partir das 8h e tem seu pico entre as 13h e 14h, a partir das 16h a temperatura cai, mas se mantém mais alta, comportamento que é resultado da radiação solar incidente nas superfícies urbanas, principalmente proveniente das edificações e calçamentos. Esse efeito mantém a temperatura da área urbana mais elevada.

Figura 9. Dados horários de temperatura de bulbo seco para o dia 15 de junho

Fonte: As autoras (2020).

Ao analisar os dados de um dia específico, representado aqui pelo dia 14 de fevereiro e 15 de junho (Figura 8 e Figura 9), demonstra-se que o comportamento da curva tem coerência com o comportamento da variável de temperatura do ar no contexto urbano (comparação da curva de Ta do SIMEPAR x UWG).

Os resultados encontrados nesse estudo são similares aos encontrados por Hamdi *et al.* (2024) em um estudo que comparou resultados obtidos pelo UWG, a partir de dados climáticos de três estações meteorológicas rurais em Toulouse (França), com dados climáticos medidos na área urbana analisada. Os autores concluíram que o UWG apresentou boa convergência de valores de temperatura do ar, mas que a precisão do UWG varia de acordo com os dados climáticos de cada estação analisada. Além disso, os autores observaram valores mais altos de temperatura entre 18h e 8h do dia seguinte, como observado no caso de Curitiba em fevereiro (Figura 8) e junho (Figura 9).

A diferença dos valores gerados pelo UWG e os dados do SIMEPAR (TRY 2008) pode ser resultado da diminuição de eficiência do UWG para regiões urbanas que possuem densidade construída muito diferente, com usos mistos (Salvati; Roura; Cecere, 2016), visto que o UWG tem melhor performance em áreas densamente construídas (Hamdi *et al.*, 2023).

No caso em estudo, o entorno urbano em volta da estação meteorológica do SIMEPAR (raio de análise) apresenta diferentes características de ocupação, com a existência de parte de uma reserva de mata nativa, o próprio campus da UFPR e parte do bairro predominantemente residencial Jardim das Américas.

Outra possível explicação para a diferença dos valores gerados pelo UWG está relacionada com a base de dados utilizada para comparação. Os dados escolhidos para a comparação são referentes ao ano climático de referência TRY 2008, que é considerado um ano típico, sem grandes variações de temperatura. Enquanto o arquivo base de entrada (SWERA) se refere ao ano de 2012, que não é considerado um ano típico.

Além disso, salienta-se que não é possível saber a metodologia utilizada para a geração do arquivo climático tido como base nesse estudo (SWERA 838400) pois, em geral, as cadeias de dados meteorológicos históricos possuem falhas de medição, podendo ter falta de dados de horas, meses ou até mesmo anos. Dessa forma, uma correção é necessária, para preenchimento dos dados faltantes e aqui evidencia-se que não se pode afirmar qual foi a metodologia adotada para a geração do arquivo climático tido como base.

4 Considerações Finais

Esse estudo avaliou a simulação de dados microclimáticos pelo algoritmo UWG, a partir da alteração da variável de temperatura de bulbo seco. O arquivo UWG foi gerado a partir dos dados meteorológicos da estação do Aeroporto Afonso Pena (SWERA 838400). Foram feitas análises comparativas entre o arquivo UWG e os dados da estação meteorológica do SIMEPAR, para o ano climático TRY de 2008.

Foi possível identificar que o modelo pode ser validado para a alteração de arquivos climáticos provenientes de estações rurais, mesmo com as inconsistências do algoritmo para porções urbanas com características de ocupação não homogêneas. Pois os resultados apresentados demonstram coerência no comportamento da variável climática de temperatura do ar, ao longo das horas dos dias, assim como ao longo dos meses, ao comparar os dados de temperatura do ar dados UWG e do SIMEPAR.

Os dados diários de temperatura do ar demonstraram que o arquivo gerado com o UWG, apesar de ter diferenças com o medido pela estação meteorológica do SIMEPAR, representa bem o comportamento da temperatura do ar, para um dia de verão e um dia de inverno para Curitiba. Como afirmam Alchapar *et al.* (2019), o modelo UWG é uma ferramenta eficiente em termos de tempo de execução, ao se comparar com outros simuladores urbanos, sendo um modelo versátil e compatível com simuladores de termo energéticos de edificações, devido ao formato epw do arquivo climático.

Indica-se que novos estudos sejam realizados avaliando outras variáveis climáticas como temperatura radiante e umidade relativa do ar, assim como, pesquisas que estudem outras áreas de Curitiba, em porções que sejam mais homogêneas em densidade de construção e vegetação. Além de pesquisas que validem os resultados com medições locais.

Agradecimentos

As autoras agradecem ao Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR) pelo fornecimento dos dados temperatura do ar.

Referências

- ALCHAPAR, Noelia L.; PEZZUTO, Cláudia C.; CORREA, Erica N.; SALVATI, Agnese. Thermal Performance of the Urban Weather Generator Model as a Tool for Planning Sustainable Urban Development. *Geographica Pannonica*, v. 23, n. 4, p. 374-384, Dezembro, 2019 (special issue). doi: <https://doi.org/10.5937/gp23-24254>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 15.220 – parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social*. ABNT: Rio de Janeiro, 2003.
- BANDE, L.; AFSHARI, A.; AL MASRI, D.; JHA, M.; NORFORD, L.; TSOUPOS, A.; MARPU, P.; PASHA, Y.; ARMSTRONG, P. Validation of UWG and ENVI-Met Models in an Abu Dhabi District, Based on Site Measurements. *Sustainability*, v. 11, n. 16, 2019, p. 4378-4398. <https://doi.org/10.3390/su11164378>
- BUENO, Bruno; NORDFORD, Leslie; HIDALGO, Julia; PIGEON, Grégoire. The Urban Weather Generator. *Journal of Building Performance Simulation*, v.6, n.4, p. 269–281, 2012. doi: <https://doi.org/10.1080/19401493.2012.718797>
- BUENO, Bruno; ROTH, Matthias; NORDFORD, Leslie; LI, Reuben. Computationally efficient prediction of canopy level urban air temperature at the neighbourhood scale. *Urban Climate*, v.9, p. 35-53, 2014. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.05.005>
- BUENO, B. *An Urban Weather Generator Coupling a Building Simulation Program with an Urban Canopy Model*. 2010. 152f. Dissertação (Master of Science in Building Technology), Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- CANDIDO, Cristiane Rossatto. *Análise da influência do entorno urbano no desempenho térmico e energético de edificação em Curitiba*. 2020. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Paraná, 2020.
- CANDIDO, C. R.; ROSSI, F. A. ANO CLIMÁTICO DE REFERÊNCIA PARA CURITIBA: COMPARAÇÃO ENTRE DADOS DE DUAS ESTAÇÕES. *Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído*, 15, 2019, João Pessoa. Anais... Mudanças climáticas, concentração urbana e novas tecnologias. João Pessoa: 2019, p. 1021-1030.
- CANDIDO, Cristiane Rossatto; ROSSI, Francine Aidie. Entorno urbano e a sua relação com o desempenho térmico em edificação em Curitiba – PR. *Revista de Arquitetura IMED*, Passo Fundo, v. 13, n. 1, p. 50-69, dez. 2024. ISSN 2318-1109. Disponível em: <https://seer.atitus.edu.br/index.php/arqimed/article/view/5043>. doi: <https://doi.org/10.18256/2318-1109.2024.v13i1.5043>.
- CHIESA, G; PALME, M. Valutare la vulnerabilità urbana ai cambiamenti climatici e alle isole di calore urbano. *TECHNE*, v. 15, p. 237-245, 2018. ISSN: 2239-0243.
- CONGEDO, L. *Semi-Automatic Classification Plugin Documentation*. Rome, 266 f. 2020.
- COSTA NETO, P. L. de O. *Estatística Básica*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.
- EOS. Sentinel 2 Satellite Images. Disponível em: <https://eos.com/find-satellite/sentinel-2>.
- GOULART, S.; LAMBERTS, R.; FIRMINO, S. *Dados climáticos para projeto e avaliação*

energética de edificações para 14 cidades brasileiras. Florianópolis: PROCEL/Núcleo de Pesquisa em Construção; UFSC, 1998.

HAMDI, H.; ROUPIOZ, L.; CORPETTI, T.; BRIOTTET, X. Evaluation of the Urban Weather Generator on the City of Toulouse (France). *Applied Sciences*, v. 24, n. 1, 185, 2024. doi: <https://doi.org/10.3390/app14010185>

HAMDI, H.; ROUPIOZ, L.; CORPETTI, T.; BRIOTTET, X.; LEFEBVRE, A. Evaluation of Urban Weather Generator for air temperature and urban heat islands simulation over Toulouse (France). In: *Proceedings of the 2023 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*, Maio 2023, Heraklion, Greece. Proceedings... p.1-4. doi: <https://doi.org/10.1109/JURSE57346.2023.10144216>

LIMA, I.; SCALCO, V.; LAMBERTS, R. Estimating the impact of urban densification on high-rise office building cooling loads in a hot and humid climate. *Energy and Buildings*, v. 182, p. 30-44, 2019. ISSN:0378-7788.

MACHADO, R. M. S. *Modelagem do impacto da ilha de calor urbano sobre o desempenho energético de escritórios condicionados artificialmente*. 2019. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2019.

NAKANO, A. *Urban Weather Generator User Interface Development: Towards a Usable Tool for Integrating Urban Heat Island Effect within Urban Design Process*. 2015. 141f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica), Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, 2015. Disponível em: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/99251> Acesso em: 06/01/2025.

OKE, T. R. *Boundary Climate Layers*. 2º ed, Taylor & Francis e-Library: 1987.

OKE, T. R. *Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites*. World Meteorological Organization, 2004

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the KöppenGeiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, v. 11, n. 5, p. 1633-1644, 2007.

RORIZ, M. Uma proposta de Revisão do Zoneamento Bioclimático Brasileiro. ANTAC, São Carlos, São Paulo. 2012. Disponível em: http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/projetos/Proposta_Revisao_Zoneamento_Bioclimatico.pdf. Acesso em: 14/05/2019.

ROSSI, F. A.; DUMKE, E.; KRÜGER, E. L. Atualização do Ano Climático de referência para Curitiba. In: X Encontro nacional de conforto em ambientes construídos, 2009, Natal. In: *X Encontro Nacional e VI Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído*, 2009. p. 1-10.

SALVATI, A.; ROURA, H. C.; CECERE, C. Urban heat island prediction in the mediterranean context: an evaluation of the urban weather generator model. *ACE: Architecture, City and Environment*, v. 11, n. 32, p. 135-156, 2016. ISSN: 1886-4805.

SALVATI, A.; PALME, M.; CHIESA, G.; KOLOKOTRONI, M. Built form, urban climate and building energy modelling: case-studies in Rome and Antofagasta, *Journal of Building Performance Simulation*, v.1, p. 1-17, 2020.