

## Modelagem térmica de Telhados Verdes

### *Thermal modelling of Green Roofs*

Fabiana Campos Pimentel<sup>1</sup>; Rutineia Tassi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Aluno do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil. Orcid: 0009-0004-4668-5575. E-mail: [fabiana.pimentel@acad.ufsm.br](mailto:fabiana.pimentel@acad.ufsm.br)

<sup>2</sup>Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil. Orcid: 0000-0002-8315-5686. E-mail: [rutineia@gmail.com](mailto:rutineia@gmail.com)

**RESUMO:** As mudanças urbanas destacam a necessidade de expandir os espaços vegetados em áreas construídas. Nesse sentido, telhados verdes representam uma oportunidade, principalmente devido ao seu potencial em fornecer serviços ecossistêmicos. Entre os componentes dos telhados verdes, os substratos são essenciais, e podem ser aprimorados para melhorar suas propriedades térmicas, influenciando a transferência de calor para o interior das edificações. O uso de aditivos em substratos visando otimização térmica é uma alternativa atraente, especialmente quando incluem passivos ambientais que os tornam leves e mais econômicos. O desempenho térmico dos telhados verdes também depende das condições meteorológicas, que regulam a temperatura dos substratos. Este estudo realizou a modelagem térmica da temperatura interna de cinco substratos de telhados verdes idênticos, diferenciados apenas pela composição dos substratos. Foram utilizados modelos aditivos generalizados e modelos lineares, a partir de dados coletados durante os meses de verão de 2021 e 2022, bem como foi avaliada a correlação das temperaturas monitoradas com as variáveis meteorológicas. Os substratos eram de solo local (SOLO), substrato comercial (SCOM) e três misturas incorporando casca de arroz carbonizada, resíduos da construção civil, vermiculita e vermicomposto ao solo local (SC2, SC4 e SC5). Os resultados mostraram correlações variando de moderada a forte entre a temperatura interna dos substratos e as variáveis climáticas, especialmente temperatura e umidade do ar. Foi proposto um modelo de previsão de temperaturas internas dos telhados verdes com coeficiente Nash-Sutcliffe de até 0,86, mostrando-se eficaz para avaliar cenários de benefícios térmicos dos telhados verdes sob diferentes condições meteorológicas.

**Palavras-chave:** GAMLSS; Variáveis meteorológicas; Ilha de Calor Urbano.

**ABSTRACT:** *Urban changes highlight the need for expand vegetated spaces in built environments. In this sense, green roofs represent a valuable opportunity due to their potential to provide ecosystem services. Among the components of green roofs, substrates are essential and can be optimized to enhance their thermal properties, thus influencing heat transfer into buildings. Using additives in substrates for thermal optimization is a promising approach, especially when these additives include environmental by-products that make the substrates lighter and more cost-effective. The thermal performance of green roofs is also influenced by meteorological conditions that regulate substrate temperatures. This study conducted thermal modeling of the internal temperature of five green roof substrates by using generalized additive models and linear models based. Data collected during the summer months of 2021 and 2022 from five identical green roofs, except for their substrate composition - local soil (SOIL), commercial substrate (SCOM), and three mixtures incorporating carbonized rice husk, construction waste, vermiculite, and vermicompost into the local soil (SC2, SC4 and SC5) - were assessed. The correlation between monitored temperatures and meteorological variables was also assessed. The results showed correlations ranging from moderate to strong between the internal temperature of the substrates and climatic variables, especially temperature and humidity. It was proposed a predictive model for the internal temperatures of green roofs, achieving a Nash-Sutcliffe coefficient of up to 0.86, effectively evaluating the thermal benefits of green roofs under different meteorological conditions.*

**Keywords:** GAMLSS; Meteorological variables; Urban Heat Island.

## INTRODUÇÃO

A inclusão de telhados verdes no ambiente urbano proporciona benefícios que incluem a restauração dos processos naturais e mitigação de problemas ambientais existentes dentro do ecossistema urbano (Naranjo *et al.*, 2020b; Francis; Jensen, 2017). Um dos benefícios a ser destacado é o térmico, que está associado à promoção do resfriamento do ar próximo ao telhado e no interior das edificações, auxiliando na mitigação das Ilhas de Calor Urbanas (ICUs) (Coutts, *et al.*, 2013; Li, D., *et al.*, 2014; Susca *et al.*, 2011; Zinzi; Agnoli, 2012), causadas pelo aumento das áreas construídas e impermeabilizadas (EPA, 2008; Vandegrift *et al.*, 2019). Telhados verdes também representam uma oportunidade de expandir as superfícies vegetadas em ambientes urbanos onde essas áreas são limitadas ou, ainda, inexistentes (Lata *et al.*, 2018; Marasco *et al.*, 2014; Sproul *et al.*, 2014; Vandegrift *et al.*, 2019).

A presença da vegetação nos telhados das edificações reduz a transmissão de calor ao refletir parcialmente a radiação solar, além de promover sombreamento e redução do calor devido ao aumento das taxas de evapotranspiração (Bliss, 2007). No entanto, a ampliação dos benefícios térmicos dos telhados verdes deve-se especialmente às propriedades termofísicas do substrato utilizado (Cascone *et al.*, 2019) que, além de sustentar a própria vegetação, atua diretamente na transferência das cargas térmicas (Gong *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2021). Há uma gama de possibilidades de composição para o substrato de telhados verdes, que pode receber adaptações conforme as particularidades climáticas e ambientais de cada local (Liberalesso *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2021), espécies vegetais a serem utilizadas, além de aditivos que podem ser incorporados a essa camada (Lata *et al.*, 2018). De qualquer forma, a composição do substrato do telhado verde deve proporcionar condições para que a vegetação possa se desenvolver de forma plena, como apresentar um alto teor de matéria orgânica (FLL, 2018; Vandegrift *et al.*, 2019), ser estável, leve (Shafique *et al.*, 2018), propiciar aeração, ter uma boa Capacidade de Troca de Cátions (CTC) e reter nutrientes (Liberalesso *et al.*, 2021).

A casca de arroz, subproduto da cultura do arroz, é um material com elevado teor de porosidade (Guerrini; Trigueiro, 2004), sendo benéfico para o comportamento térmico de telhados verdes, além de ser um subproduto com valor agregado devido sua queima (Mayer *et al.*, 2006; Vlaev *et al.*, 2003). Sua incorporação no substrato de telhados verdes vai ao encontro dos princípios da sustentabilidade (Naranjo *et al.*, 2020a), uma vez que sua utilização promove uma destinação alternativa e adequada deste resíduo da indústria, que é gerado em grande volume (Mayer, *et al.*, 2006) e necessita um tempo considerável para sua decomposição (5 anos) (Li, Y. *et al.*, 2011; Mayer *et al.*, 2006).

Nesse trabalho foram investigados os efeitos de cinco diferentes substratos no desempenho térmico de módulos de telhados verdes. Além do uso de um substrato à base de solo local e substrato comercial, foram avaliados três substratos alternativos desenvolvidos por Liberalesso (2018) a partir da Casca de Arroz Carbonizada (CAC) em diferentes proporções, além da introdução de resíduos da construção civil (para aumento da porosidade), vermiculita (para maior aeração e tornar o substrato mais leve) e vermicomposto (para aumento da matéria orgânica).

## MATERIAL E MÉTODOS

### LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

A instalação experimental dos telhados verdes foi realizada em área destinada ao grupo de pesquisa em Modelagem Hidroambiental e Ecotecnologias, situada nas dependências do Campus Sede da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) no município de Santa Maria. O local está situado nas coordenadas geográficas de latitude 29°42'48"S e longitude 53°43'07"O. Conforme a classificação de Köppen (WMO, 2018), a cidade de Santa Maria tem seu clima classificado como subtropical úmido (Cfa), com uma temperatura média de 19,3°C. Durante os verões as temperaturas comumente ultrapassam os 30°C, com mínimas médias abaixo dos 19°C. Já durante o inverno, as máximas atingem 19°C e as mínimas variam entre 9°C e -5°C, sendo raramente observada a presença de neve (Löbler *et al.*, 2015). Quanto à precipitação, a média anual é de 1688mm, bem distribuída durante o ano, com predominância de precipitações convectivas durante a primavera e o verão, e chuvas frontais durante o inverno (INMET, 2022).

Os módulos de telhados verdes foram instalados lado a lado em bancada experimental. No total, foram utilizados 10 módulos experimentais de telhados verdes (**Figura 1a**), idênticos na sua composição, exceto pelos substratos que possuem 5 composições distintas, em sistema de duplicata. Os módulos foram construídos em containers plásticos de 20 dm<sup>3</sup> cada, possuindo dimensões de 36 cm x 27 cm x 15cm (**Figura 2**). Os módulos foram posicionados lado a lado, nas extremidades foram utilizados módulos não monitorados para evitar o efeito de borda. Em cada módulo experimental foram simuladas as condições de um telhado verde multicamadas, sendo que do fundo para a superfície foram utilizados: uma camada de 10 mm de uma geomembrana drenante (MacDrain 2L®), geotêxtil, 10 cm de substrato (um tipo de substrato para cada módulo) e vegetação (*Sedum rupestre*). Os módulos de telhados verdes podem ser considerados maduros, visto que já estão instalados desde junho de 2017. Uma descrição mais detalhada da concepção dos módulos de telhado verde pode ser encontrada em Liberalesso (2018) e Liberalesso *et al.* (2021).

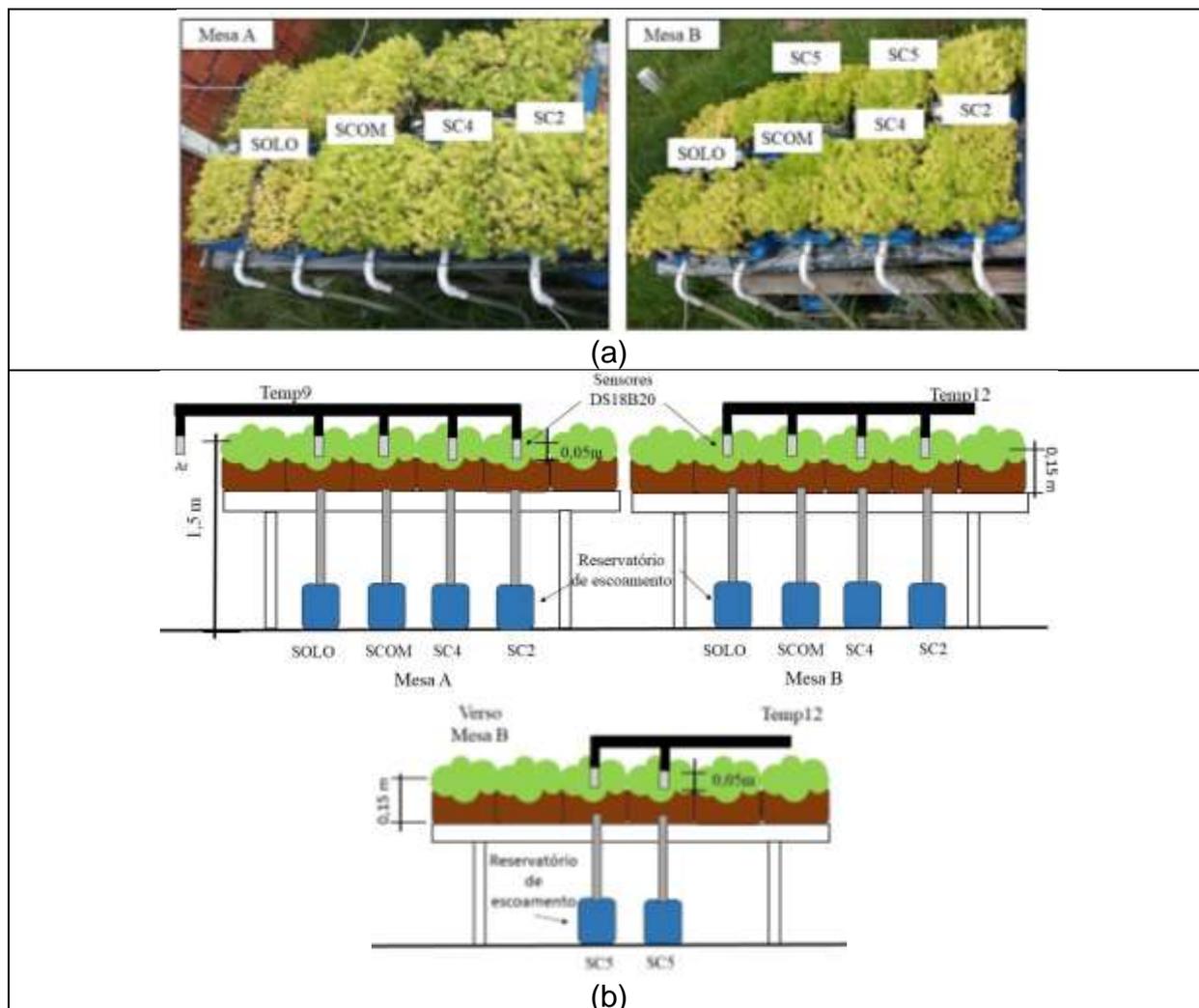
Os substratos dos módulos de telhados verdes têm a seguinte composição:

- i) Solo local (SOLO) obtido a partir do horizonte A de Latossolo Vermelho Distroférico Típico, caracterizado em laboratório. Para a utilização do solo local foi descartada a camada superficial. Este substrato apresenta a alternativa mais econômica para telhados verdes locais.
- ii) Substrato alternativo (SC2), desenvolvido por Liberalesso *et al.* (2021) com a incorporação de 40% de biocarvão de casca de arroz carbonizada a 10% de solo local (Latossolo Vermelho Distroférico Típico) e 50% de outros componentes, como resíduos da construção civil, vermiculita e vermicomposto.
- iii) Substrato alternativo (SC4), desenvolvido por Liberalesso *et al.* (2021) com a incorporação de 20% de biocarvão de casca de arroz carbonizada a 30% de solo local (Latossolo Vermelho Distroférico Típico) e 50% de outros componentes, como resíduos da construção civil, vermiculita e vermicomposto.
- iv) Substrato alternativo (SC5), desenvolvido por Liberalesso *et al.* (2021) com a incorporação de 10% de biocarvão de casca de arroz carbonizada a 40% de solo local

(Latossolo Vermelho Distroférico Típico) e 50% de outros componentes, como resíduos da construção civil, vermiculita e vermicomposto.

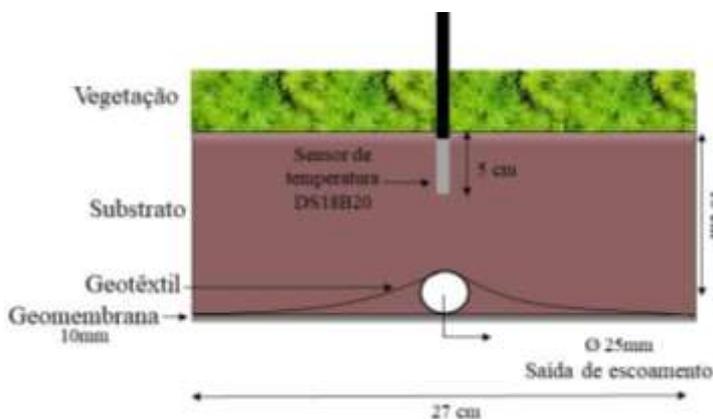
v) Substrato comercial (SCOM), a base de turfa Garden Plus ®. Este substrato representa a opção comercial na região, no entanto é a opção com maior custo de aquisição.

**Figura 1.** Disposição dos módulos de telhados verdes (a). Disposição dos sensores, reservatórios de drenagem do escoamento superficial (b)



As proporções volumétricas utilizadas na formulação dos substratos alternativos, e as características de porosidade dos substratos avaliados estão apresentadas na **Tabela 1**.

**Figura 2.** Esquema da instalação experimental do módulo de telhado verde



**Tabela 1.** Proporções volumétricas e porosidade dos substratos utilizados

Substrato	CAC (%)	Solo local (%)	Outros (%)	P.T (%)	MO	CTC
SC2	40	10	50	68	4,8	16,2
SC4	20	30	50	62	4,0	16,6
SC5	10	40	50	60	3,6	16,1
SOLO	0	100	0	55	1,7	10,6
SCOM	0	0	100*	82	19,4	71,5

CAC: Casca de Arroz Carbonizada; Outros: Vermiculita (15%), resíduo da construção civil (20%) e vermicomposto (15%); \*substrato comercial a base de turfa (SCOM); SOLO: Argissolo Vermelho Distroférico Típico (Horizonte A); P.T: Porosidade Total. M.O: Matéria Orgânica. CTC: Capacidade de troca de cátions em pH7.

Dentre os substratos com adição de CAC, o SC2 apresenta maior porosidade total. Já o substrato SC4 apresenta maior CTC, facilitando o armazenamento de nutrientes essenciais para o crescimento vegetal. O substrato comercial apresenta características distintas aos demais, com maiores percentuais de porosidade, maior conteúdo de matéria orgânica e maior CTC, indicando que a vegetação nesse substrato tenderá a ter maior desenvolvimento.

## SISTEMA DE MONITORAMENTO

O monitoramento térmico da temperatura do ar e no interior do substrato foi realizado durante o período de dezembro de 2021 a março de 2022, abrangendo o verão. Foram utilizados 11 sensores de temperatura a prova d'água do tipo DS18B20 com precisão de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  (10 sensores para o monitoramento dos módulos de telhados verdes, e 1 para o monitoramento do ar externo) conectados a uma placa Arduino UNO. O intervalo de medição utilizado foi de 5 minutos, e um dispositivo de memória flash (módulo sd card) foi utilizado para armazenamento dos dados cuja coleta teve periodicidade semanal.

Para o monitoramento da temperatura interna de cada substrato o sensor foi posicionado a 5 centímetros de profundidade, a partir da superfície da camada do substrato, como pode ser visto na **Figura 1b** e **Figura 2**. Já para o monitoramento da temperatura do

ar (temperatura ambiente) local, o sensor foi posicionado a 1,5m do solo, no mesmo nível em que se encontram os módulos de telhado verde. Para evitar a exposição direta do sensor à radiação solar foi utilizada uma cúpula de isopor sem revestimento interno que permitiu o monitoramento apenas da temperatura do ar.

## DADOS METEOROLÓGICOS

Os dados meteorológicos foram obtidos a partir do Banco de Dados Meteorológicos do INMET (BDMEP), da estação automática A803 (dados horários). Foram obtidas as variáveis meteorológicas: Temperatura do ar (°C) (Ar), umidade do ar (%) (U), Ponto de orvalho (°C) (Orv), Pressão atmosférica (hPa) (Patm), velocidade do vento (m/s) (vento) e radiação (kJ/m<sup>2</sup>) (Rad) e precipitação (mm) (P). A temperatura do ar obtida na estação automática A803 foi utilizada para a consistência da temperatura do ar monitorada junto ao experimento. As demais variáveis foram utilizadas para verificar sua correlação com as respectivas temperaturas internas das composições de substrato. Para isso foi utilizado como métrica o coeficiente de correlação entre as variáveis.

## TRATAMENTO ESTATÍSTICO

Os dados oriundos do monitoramento foram organizados em planilha eletrônica para facilitar as análises estatísticas a serem realizadas. O software R (R Core Team, 2017) foi utilizado durante as análises. Foi utilizado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk para verificação da normalidade nos dados coletados.

Os dados que apresentaram normalidade conforme o teste de Shapiro Wilk tiveram suas correlações analisadas utilizando testes paramétricos de Scott-Knott e pelo coeficiente de correlação de Pearson (R<sup>2</sup>). O coeficiente varia entre 0 e 1. Hopkins (2000) classifica os valores da seguinte forma: muito baixa 0 <R≤ 0,1; baixa 0,1<R≤0,3; moderada 0,3<R≤0,5; alta 0,5<R≤0,7; muito alta 0,7<R≤0,9; quase perfeita 0,9<R≤1,0. Os dados que não apresentaram normalidade foram analisados utilizando o teste não paramétricos de Kruskal-Wallis, juntamente da correlação de Spearman. O coeficiente de correlação de Spearman varia entre -1 a 1. Um coeficiente igual a zero significa que não há correlação entre os dados, já os valores de -1 e 1 indicam correlações perfeitas negativas ou positivas, respectivamente. As correlações foram classificadas neste trabalho como: fraca 0,2<ρ≤0,4; moderada 0,4 <ρ≤0,7; e forte 0,7 <ρ≤0,9 tanto para valores positivos quanto negativos de ρ.

## MODELAGEM

Para a elaboração dos modelos foram utilizadas duas abordagens: i) modelos lineares utilizando Regressões Lineares Múltiplas (RLM) e ii) modelos aditivos generalizados para localização, escala e forma (GAMLSS), em inglês *Generalized Additive Models for Location, Scale and Shape*.

O modelo linear pode ser descrito conforme a equação 1:

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_nx_n \quad (1)$$

Onde  $y$  é a variável prevista,  $x_1, x_2, \dots, x_n$  são as variáveis preditoras;  $\beta_0$  é o intercepto  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$  são os coeficientes de regressão correspondentes a cada variável independente. Cada coeficiente quantifica a mudança de  $y$  para uma unidade de mudança na respectiva variável  $x_n$ .

O modelo aditivo generalizado GAMLSS pode ser descrito conforme a equação 2:

$$g_k(\theta_k) = n_k = X_k\beta_k + \sum_{j=1}^{J_k} Z_{jk}\gamma_{jk} \quad (2)$$

Onde,  $g_k$  é a função de ligação para o parâmetro  $\theta_k$ ;  $k=1, 2, \dots, k$ ;  $n$  é o preditor linear  $\beta$  é o vetor de parâmetros de efeito fixo do modelo linear,  $X$  é uma matriz experimental;  $\gamma$  é um vetor de efeitos aleatórios associados às variáveis e/ou fatores expressos na matriz experimental  $Z$ .

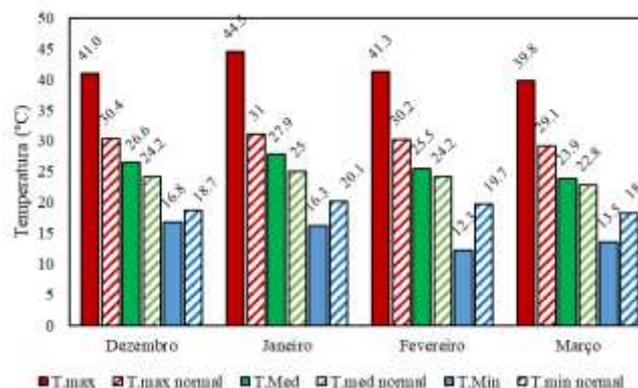
Para indicar a eficiência no ajuste dos modelos foram utilizados os coeficientes: Percent Bias (PBIAS), Nash-Sutcliffe (NASH) e o critério de Akaike (AIC).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### TEMPERATURAS MONITORADAS E RELAÇÃO COM VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS

O monitoramento da temperatura do substrato ocorreu no período entre 21/12/2021 e 20/03/2022, abrangendo 90 dias do verão. Os dados de temperatura do ar foram consistidos com os obtidos na estação A803, pertencente à rede de monitoramento do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Observou-se uma correlação de Spearman positiva, com  $\rho$  de 0,98, validando os dados de temperatura do ar obtidos no monitoramento. A **Figura 3** apresenta uma descrição das temperaturas máximas, médias e mínimas do ar durante o período monitorado comparativamente às normais climatológicas do período 1991-2020.

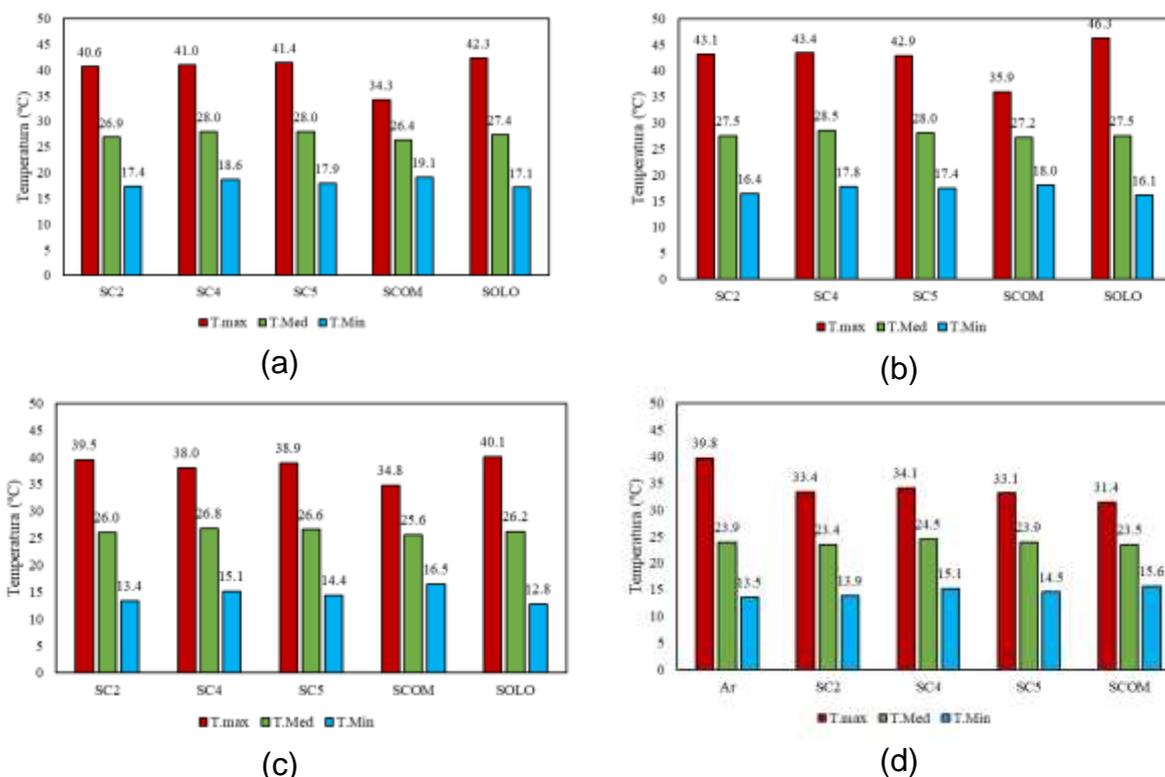
**Figura 3.** Temperatura do ar ao longo do período de monitoramento e comparativo com a normal climatológica (1991-2020) do INMET



Pode-se verificar as elevadas temperaturas máximas durante o mês de janeiro, mês no qual historicamente ocorrem as temperaturas mais altas, características do verão de Santa Maria. Ressalta-se que as temperaturas máximas excederam o observado para as normais climatológicas do período de 1991 a 2020, indicando grande potencial para

introdução dos telhados verdes no planejamento de novas edificações. Também foram observadas temperaturas internas elevadas nos substratos (**Figura 4**) durante os meses de janeiro (**Figura 4b**). Nos meses de verão, onde as temperaturas do ar comumente excedem os 40°C, a habilidade dos telhados verdes em reduzir as temperaturas para ambientes internos pode ser vista como uma ferramenta útil para tornar as edificações atuais mais resilientes às modificações nas temperaturas urbanas, além de contribuir pela redução de demandas energéticas nas edificações.

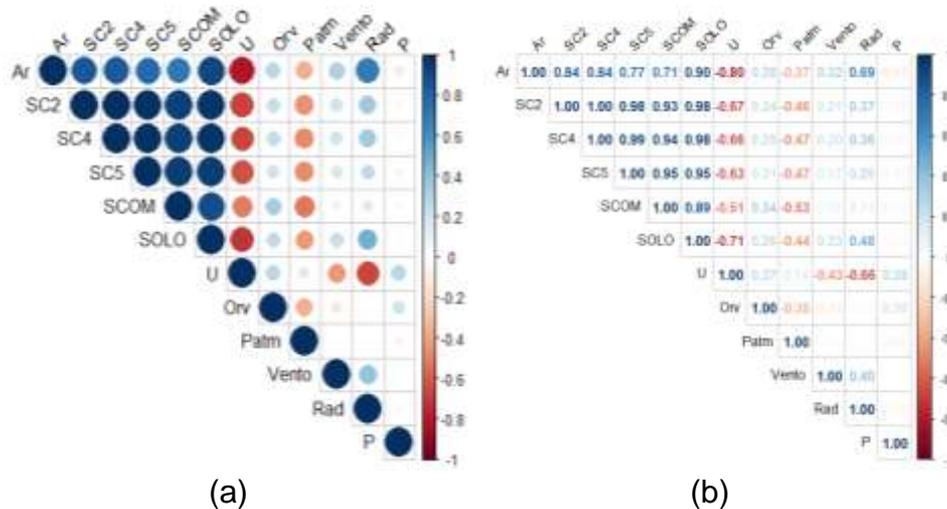
**Figura 4.** Temperatura no interior dos substratos ao longo dos meses monitorados: (a) dezembro, (b) janeiro, (c) fevereiro e (d) março



Conforme o teste de Shapiro Wilk, os dados de temperatura não apresentaram distribuição normal ( $p\text{-valor} < 0,05$ ). Dessa forma, a correlação entre as temperaturas dos substratos e as variáveis meteorológicas foi realizada utilizando a correlação de Spearman (**Figura 5**).

Destaca-se a forte correlação positiva entre as temperaturas dos substratos e a temperatura do ar, cuja correlação de Spearman apresentou valores de  $\rho$  variando entre 0,71 e 0,90, indicando que as temperaturas internas dos substratos respondem sensivelmente às temperaturas do ar. A umidade do ar por sua vez, teve correlação moderada negativa, indicando que menores valores de umidade foram associados a maiores temperaturas do substrato, assim como para a pressão atmosférica. Para as variáveis vento, radiação e precipitação as correlações encontradas foram consideradas positivamente fracas.

**Figura 5.** Correlação entre variáveis climatológicas e temperaturas dos substratos a) visualização gráfica da matriz de correlação de Spearman e b) Coeficientes de correlação de Spearman



U: umidade do ar (%), Orv: Temperatura do ponto de orvalho (°C), Patm: Pressão atmosférica, Vento: velocidade do vento (m/s), Rad: Radiação solar (kJ/m<sup>2</sup>), P: Precipitação (mm).

## MODELAGEM DE PREVISÃO DA TEMPERATURA NOS SUBSTRATOS

A partir das correlações de Spearman apresentada na **Figura 4** foram elaborados 2 modelos de previsão, utilizando as variáveis meteorológicas estatisticamente significativas, para cada um dos substratos, sendo um linear e outro aditivo generalizado (GAMLSS). A **Tabela 2** apresenta os valores de AIC, NASH e PBIAS para cada um dos modelos.

Foram observados menores valores de AIC, utilizado para comparar a qualidade estatística dos modelos, para os modelos gerados a partir da técnica GAMLSS em comparação aos valores de AIC obtido para os modelos de regressão linear (RLM), indicando que os modelos GAMLSS tiveram melhor qualidade estatística quando comparados aos modelos lineares. No entanto, melhores valores de NASH e PBIAS foram observados para os modelos lineares, indicando desempenho superior, maior precisão e a ausência de viés, com exceção do modelo para o substrato SOLO que apresentou valores de NASH 0,86, tanto para o modelo linear quanto para o GALMSS.

Os valores de NASH obtidos podem ser classificados como muito bons (Weggemans *et al.*, 2023). Foram observados valores negativos de PBIAS para todos os modelos, com exceção dos modelos GALMSS dos substratos SC2, SCOM e SOLO, indicando subestimação da estimativa da temperatura interna do substrato em alguns modelos em relação à observada. No entanto, erros de volume dentro da faixa de até 20% são considerados aceitáveis (Weggemans *et al.*, 2023).

**Tabela 2.** Equações desenvolvidas para a modelagem da temperatura interna dos substratos e indicadores de desempenho dos modelos

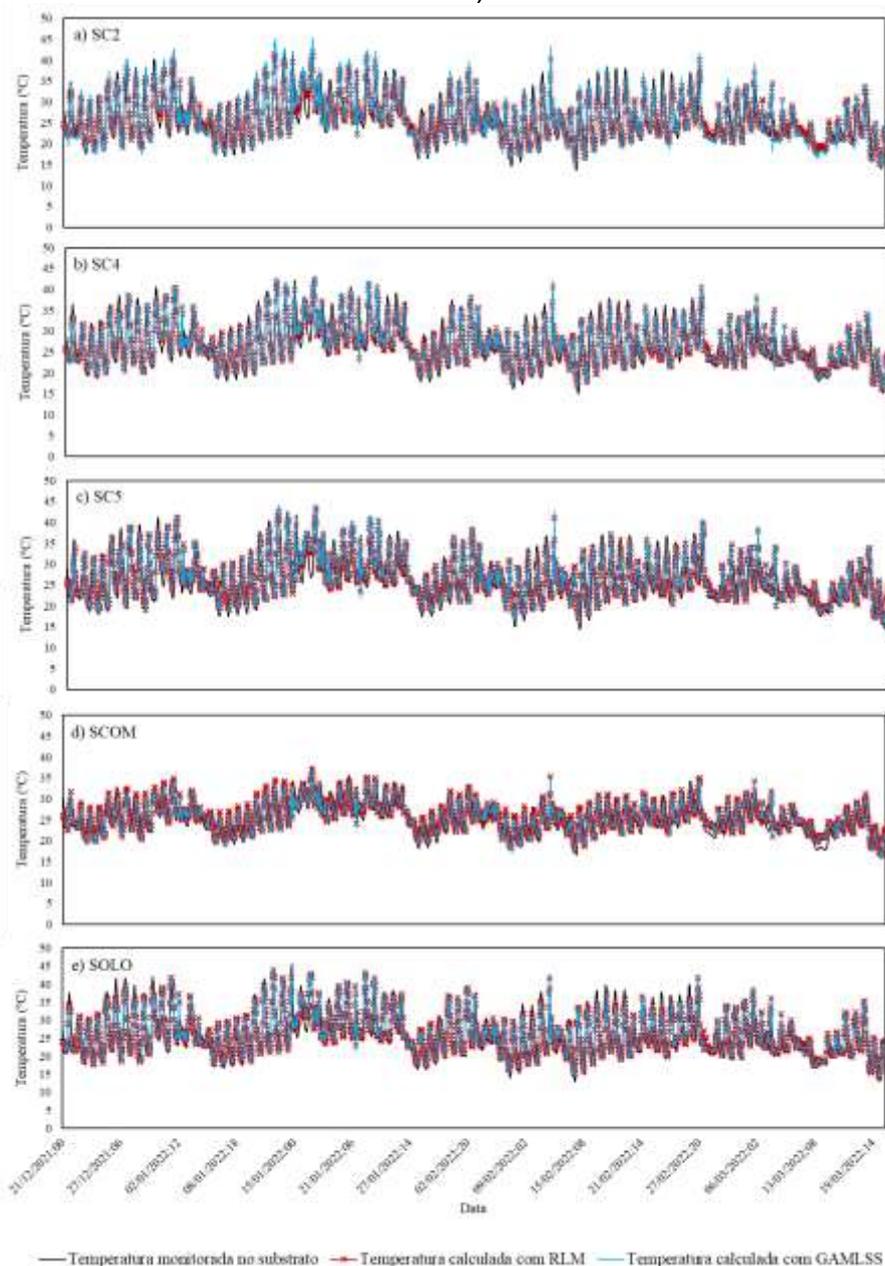
Substrato	Tipo de modelo	Equação	AIC	NASH	PBIAS
SC2	Linear	$T_{SC2}=118,0+1,25Ar+0,04U-0,44Orv-0,12Patm+0,14Vento-0,002Rad+0,15P$	9602	0,82	$-6,24 \times 10^{-13}$
	GAMLSS (SEP2)	$T_{SC2}=81,42+1,48Ar+0,03U-0,58Orv-0,08Patm-0,003Rad$	8992	0,78	0,08
SC4	Linear	$T_{SC4}=139,5+1,25Ar+0,04U-0,42Orv-0,14Patm+0,15Vento-0,002Rad+0,19P$	9368	0,83	$-6,95 \times 10^{-13}$
	GAMLSS (SHASH)	$T_{SC4}=87,8+1,39Ar+0,06U-0,40Orv-0,09Patm-0,003Rad$	8876	0,82	-0,03
SC5	Linear	$T_{SC5}=132,1+1,19Ar-0,42Orv-0,13Patm-0,003Rad+0,17P$	9887	0,80	$-6,04 \times 10^{-13}$
	GAMLSS (SHASH)	$T_{SC5}=79,1+1,41A+0,04U-0,53Orv-0,08Patm-0,003Rad$	9426	0,79	-0,19
SCOM	Linear	$T_{SCOM}=127,6+0,79Ar-0,07Orv-0,12Patm-0,002Rad+0,08P$	8532	0,79	$-7,16 \times 10^{-13}$
	GAMLSS (SEP2)	$T_{SCOM}=138,3+0,86Ar+0,03U-0,082Orv-0,13Patm-0,002Rad$	8483	0,77	0,91
SOLO	Linear	$T_{SOLO}=101,7+1,35Ar+0,06U-0,45Orv-0,10Patm-0,001Rad+0,28P$	9344	0,86	$-5,15 \times 10^{-13}$
	GAMLSS (SHASH)	$T_{SOLO}=43,7+1,53Ar+0,09U-0,54Orv-0,05Patm-0,002Rad$	8795	0,86	0,21

Ar: Temperatura do ar (°C); U: umidade do ar (%), Orv: Temperatura do ponto de orvalho (°C), Patm: Pressão atmosférica, Vento: velocidade do vento (m/s), Rad: Radiação solar (kJ/m<sup>2</sup>), P: Precipitação (mm), SEP2: Distribuição de potência exponencial assimétrica tipo 2; SHASH: Distribuição Sinh-arcsinh.

Vale destacar que nem todos os modelos utilizaram as mesmas variáveis, pois a depender do tipo de abordagem (linear ou GAMLSS) a variável pode ser significativa (p-valor<0,05) ou não. As séries temporais de temperatura interna de cada substrato obtidas a partir da modelagem linear (RLM) e aditiva generalizada (GAMLSS) são apresentadas na **Figura 6**, juntamente com a temperatura monitorada.

Pode-se observar na **Figura 6** a semelhança entre as séries de temperaturas dos substratos (linhas pretas) com as séries modeladas (linhas vermelhas para o modelo linear RLM e linha azul para modelo GAMLSS). Estes resultados indicam que variáveis meteorológicas podem ser utilizadas para a previsão de temperaturas internas dos substratos utilizando variáveis meteorológicas facilmente disponíveis em estações meteorológicas. A partir da previsão de temperaturas internas do substrato de telhados verdes podem ser realizadas análises avaliando os potenciais benefícios térmicos do uso de telhados verdes para as edificações, como a redução das temperaturas no interior dos ambientes de residências, tornando as edificações cada vez mais resilientes às mudanças climáticas, além de permitir avaliar indiretamente como os telhados verdes podem contribuir para mitigar os efeitos das ilhas de calor urbano.

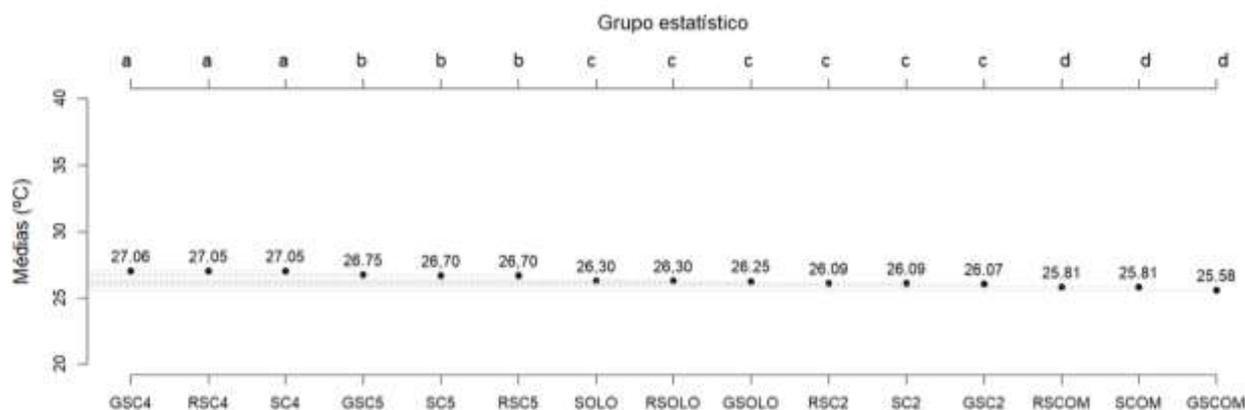
**Figura 6.** Séries temporais: monitorada e modeladas a) SC2, b) SC4, c) SC5, d) SCOM e e) SOLO



As séries de temperaturas observadas e modeladas não apresentaram distribuição normal ( $p$ -valor $<0,05$ ), de forma que a comparação entre elas foi realizada a partir do teste de Kruskal-Wallis. Para cada substrato não foi verificada diferença significativa entre as séries de temperatura observada (linhas pretas na **Figura 6**) e as séries modeladas (linhas vermelhas para o modelo linear RLM e linha azul para modelo GAMLSS). Isso indica que, para um mesmo substrato, apesar das diferenças observadas nos valores de AIC, NASH e PBIAS, os modelos são considerados estatisticamente idênticos. No entanto, entre os

substratos é possível observar a diferença significativa entre os modelos elaborados para cada substrato (**Figura 7**).

**Figura 7.** Comparação entre séries de temperaturas observadas e modeladas



GS<sub>i</sub> refere-se aos modelos aditivos generalizados GAMLSS; RS<sub>i</sub> refere-se aos modelos de regressão linear.

Pode-se verificar o agrupamento dos modelos estatisticamente semelhantes em quatro grupos (“a”, “b”, “c” e “d”). Neste agrupamento, verifica-se que os modelos e as séries observadas dos substratos SC2 e SOLO foram considerados estatisticamente idênticos (identificado pela letra “c”), com uma média de 26,18°C. Também se verifica que o substrato SC4 e seus modelos aditivo e linear apresentaram maior média de temperatura (27,05°C) (identificado pela letra “a”) durante o período analisado, de forma contrária a série e aos modelos referentes ao substrato comercial (SCOM) (identificado pela letra “d”) com a menor média de temperatura (25,81°C). De forma intermediária, os modelos gerados e a série do substrato SC5 foram agrupados no grupo identificado pela letra “b”.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou os resultados de monitoramento e modelagem de cinco composições de substratos durante o verão de 2021-2022 em Santa Maria/RS. Durante esse período, foram observadas temperaturas máximas acima das normais climatológicas, destacando o potencial do uso de telhados verdes para promover melhor conforto térmico nas edificações em um cenário de mudança climática que prevê o aumento da temperatura do ar e seus consequentes impactos. Houve uma forte correlação positiva entre a temperatura do ar e interna dos substratos, com valores de até 0,90. A umidade do ar teve correlação moderada negativa, enquanto vento, radiação e precipitação apresentaram correlações consideradas positivamente fracas.

A partir da análise de correlações, as variáveis meteorológicas melhor correlacionadas foram utilizadas para a elaboração de dois modelos preditivos de temperatura interna para cada substrato utilizando: um linear e outro aditivo generalizado (GAMLSS). De forma geral, os modelos GAMLSS apresentaram menores valores de AIC, indicando melhor adequação do modelo ao conjunto de dados, no entanto, os modelos lineares apresentaram melhor precisão e menor erro de viés. Dessa forma, modelos estatísticos podem ser utilizados para a modelagem da temperatura interna de telhados verdes. Ainda,

não foram observadas diferenças significativas entre os modelos aditivo e linear elaborados para um mesmo substrato. No entanto, entre os substratos foram observadas diferenças significativas entre os modelos, com exceção dos modelos para os substratos SC2 e SOLO, considerados estatisticamente idênticos. Estes resultados enfatizam a necessidade da modelagem, desde modelos lineares a modelos mais avançados, de forma a analisar cenários sem a necessidade de monitoramento.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), código de financiamento 001, Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), do Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental (PPGEAMB), do Programa de Pós-graduação de Engenharia Civil (PPGEC) e a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

## REFERÊNCIAS

BLISS, D. J. **Stormwater runoff mitigation and water quality improvements through the use a green roof in Pittsburgh, PA**, Tese de Doutorado, University of Pittsburgh, 2007.

CASCONE, S.; GAGLIANO, A.; POLI, T.; SCIUTO, G. Thermal performance assessment of extensive green roofs investigating realistic vegetation-substrate configurations. **Building Simulation**, v. 12, n. 3, p. 379-393, 2019.

COUTTS, A, M.; DALY, E.; BERINGER, J.; TAPPER, N. J. Assessing practical measures to reduce urban heat: Green and cool roofs. **Building and Environment**, v. 70, p. 266-276, 2013.

EPA. Environmental Protection Agency. **Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies Urban Heat Island Basics**, US Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA, p. 1–22, 2008.

FLL. **Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofing**, English ed. Forschungsgesellschaft landschaftsentwicklung landschaftsbau, Bonn, (German edition), 2018.

FRANCIS, L. F. M.; JENSEN, M. B. Benefits of green roofs: a systematic review of the evidence for three ecosystem services. **Urban For Urban Green**, v. 28, p. 167–176, 2017.

GONG, Y.; YIN, D.; FANG, X.; LI, J. Factors affecting runoff retention performance of extensive green roofs. **Water**, v. 10, n. 9, p. 1217, 2018.

GUERRINI, I. A.; TRIGUEIRO, R. M. Atributos físicos e químicos de substratos compostos por biossólidos e casca de arroz carbonizada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 1069-1076, 2004.

HOPKINS, W. G. **Correlation coefficient: a new view of statistics**, 2000. Disponível em: <https://complementarytraining.net/wp-content/uploads/2013/10/Will-Hopkins-A-New-View-of-Statistics.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2024.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Gráficos Climatológicos, Santa Maria**. 2022. Disponível em: <https://clima.inmet.gov.br/GraficosClimatologicos/RS/83936>. Acesso em: 02 ago. 2024.

LATA, J.-C.; DUSZA, Y.; ABBADIE, L.; BAROT, S.; CARMIGNAC, D.; GENDREAU, E. *et al.* Role of substrate properties in the provision of multifunctional green roof ecosystem services. **Applied Soil Ecology**, v. 123, p. 464-468, 2018.

LI, D.; BOU-ZEID, E.; OPPENHEIMER, M. The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies. **Environmental Research Letters**, v. 9, n. 5, p. 055002, 2014.

LI, Y.; DING, X.; GUO, Y.; RONG, C.; WANG, L.; QU, Y.; MA, X.; WANG, Z. 2011. A new method of comprehensive utilization of rice husk. **Journal of hazardous materials**, v. 186, n. 2-3, p. 2151-2156, 2011.

LIBERALESSO, T. **Telhados Verdes Extensivos: Influência da Composição do Substrato na Retenção Hídrica e no Desenvolvimento da Vegetação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

LIBERALESSO, T.; TASSI, R.; CECONI, D. E.; ALLASIA, D. G.; ARBOIT, N. K. S. Effect of rice HUSK addition on the physicochemical and hydrological properties on green roof substrates under subtropical climate conditions. **Journal of Cleaner Production**, p. 128133, 2021.

LÖBLER, C. A.; SCCOTI, A. A. V.; WERLANG, M. K. Contribuição à delimitação dos biomas Pampa e Mata Atlântica no município de Santa Maria, RS. **Eletrônica Gestão Educação Tecnol, Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 1250–1257, 2015.

MAYER, F. D.; HOFFMANN, R.; RUPPENTHAL, J. E. **Gestão Energética, Econômica e Ambiental do Resíduo Casca de Arroz em Pequenas e Médias Agroindústrias de Arroz**, In: Simposio de Engenharia de Produção da UNESP, 13, Bauru, SP, Anais eletrônicos, Bauru: UNESP, 2006.

MARASCO, D. E.; HUNTER, B. N.; CULLIGAN, P. J.; GAFFIN, S. R.; MCGILIS, W. R. Quantifying evapotranspiration from urban green roofs: A comparison of chamber measurements with commonly used predictive methods. **Environmental Science & Technology**, v. 48, n. 17, p. 10273-10281, 2014.

NARANJO, A.; COLONIA, A.; MESA, J.; MAURY-RAMIREZ, A. Evaluation of semi-intensive green roofs with drainage layers made out of recycled and reused materials. **Coatings**, v. 10, n. 6, p. 525, 2020a.

NARANJO, A.; COLONIA, A.; MESA, J.; MAURY, H.; MAURY-RAMIREZ, A. State-of-the-art green roofs: Technical performance and certifications for sustainable construction. **Coatings**, v. 10, n. 1, p. 69, 2020b.

R Core Team. 2017. R: a Language and Environment for Statistical Computing, R Foundation for Statistical Computing, Viena, Disponível em: <http://www.r-project.org>. Acesso em: 02 ago. 2024.

SHAFIQUE, M.; KIM, R.; RAFIQ, M. Green roof benefits, opportunities and challenges—A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 90, p. 757-773, 2018.

SPROUL, J.; WAN, M. P.; MANDEL, B. H.; ROSENFELD, A. H. 2014. Economic comparison of white, green, and black flat roofs in the United States, **Energy and Buildings**, v. 71, p. 20-27, 2014.

SUSCA, T.; GAFFIN, S. R.; DELL'OSSO, G. R. Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs. **Environmental pollution**, v. 159, n. 8-9, p. 2119-2126, 2011.

VANDEGRIFT, D. A.; ROWE, D. R.; CREGG, B. M.; LIANG, D. Effect of substrate depth on plant community development on a Michigan green roof. **Ecological Engineering**, v. 138, p. 264-273, 2019.

VLAEV, L. T.; MARKOVSKA, I. G.; LYUBCHEV, L. A. 2003. Non-isothermal kinetics of pyrolysis of rice husk. **Thermochimica Acta**, v. 406, n. 1-2, p. 1-7, 2003.

WEGGEMANS, J.; SANTOS, M. L.; FERREIRA, F.; MORENO, G. D.; MATOS, J. S. Modeling the Hydraulic Performance of Pilot Green Roofs Using the Storm Water Management Model: How Important Is Calibration?. **Sustainability**, v. 15, p. 14421, 2023.

WMO. World Meteorological Organization. **Guide to climatological practices**. Geneva: WMO, 2018.

ZHANG, S.; LIN, Z.; ZHANG, S.; GE., D. Stormwater retention and detention performance of green roofs with different substrates: Observational data and hydrological simulations, **Journal of Environmental Management**. v. 291, p. 112682, 2021.

ZINZI, M.; AGNOLI, S. Cool and green roofs: An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region. **Energy and Buildings**, v. 55, p. 66-76, 2012.

Recebido em: 29/10/2024  
Aprovado em: 12/12/2024