



XVII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
XIII ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
SÃO PAULO - SP

INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA DE IRRIGAÇÃO EM TELHADOS VERDES NO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DE EDIFICAÇÕES EM REGIÃO DO SEMIÁRIDO

Wellington Souza Silva (1); Ricardo Victor Rodrigues Barbosa (2)

(1) Mestre, Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, wellingtonsouza@usp.br, Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São-Carlense, 400, São Carlos-SP

(2) Doutor, Professor do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, rvictor@fau.ufal.br, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins, Maceió-AL, CEP 57072-900

RESUMO

A manutenção é essencial para todas as coberturas verdes, incluindo a poda e a irrigação. Para esta última, a literatura apresenta algumas orientações importantes, como: a necessidade de irrigação durante a fase de estabilização, a rega somente durante os períodos mais secos e adequada às necessidades específicas de cada espécie vegetal. Apesar da precipitação reduzir custos e a necessidade de rega, em regiões áridas e semiáridas a irrigação é necessária para a sobrevivência da vegetação. Assim, este trabalho objetivou analisar a influência da frequência de irrigação no comportamento higrotérmico de telhado verde extensivo no período quente e seco de um clima tropical (As). Foram monitorados dados de temperatura do ar e umidade relativa do ar no interior de células-teste com telhados verdes com espécie *Zoysia japonica*, instalados na cobertura, durante 29 dias, com três tratamentos de irrigação: sem irrigação, irrigação semanal e irrigação diária. O déficit de água nas coberturas sem irrigação e irrigação semanal reduziu o crescimento vegetal e as folhas tornaram-se murchas, secas e com coloração amarronzada, enquanto a irrigação diária manteve a vegetação saudável durante o monitoramento. Nos valores médios para todo o período, a cobertura com irrigação diária reduziu a temperatura do ar interno em 0,4°C e aumentou a umidade relativa do ar interno em 4,5%, comparada ao telhado verde sem irrigação. Pode-se concluir que a rega teve maior influência na umidade relativa no interior da célula-teste, sendo pouco expressiva para a redução da temperatura do ar interno.

Palavras-chave: arquitetura bioclimática, cobertura verde, irrigação, desempenho térmico, célula-teste.

ABSTRACT

Maintenance is essential for all green roofs, including pruning and irrigation. For the latter, the literature presents some important guidelines, such as the need for irrigation during the stabilization phase, watering only during the driest periods and suitable for the specific needs of each plant species. Although precipitation reduces costs and the need for irrigation, in arid and semi-arid regions, irrigation is necessary for the survival of vegetation. Thus, this study aimed to analyze the influence of irrigation frequency on the hygrothermal performance of an extensive green roof during the hot and dry period of a tropical climate (As). Air temperature and relative humidity data were monitored inside test cells with green roofs of *Zoysia japonica* species installed on the roof for 29 days, with three irrigation treatments: no irrigation, weekly irrigation, and daily irrigation. The water deficit in the roofs without irrigation and weekly irrigation reduced plant growth and leaves became wilted, dry, and brownish in color, while daily irrigation kept vegetation healthy during monitoring. In the average values for the entire campaign, the green roof with daily irrigation reduced the indoor air temperature by 0.4 °C and increased the indoor relative humidity by 4.5%, compared to the green roof without irrigation. It can be concluded that irrigation had a greater influence on the indoor relative humidity of the test cell, with little effect on reducing indoor air temperature.

Keywords: bioclimatic architecture, green roof, irrigation, thermal performance, test cell.

1. INTRODUÇÃO

Telhados verdes são sistemas de cobertura utilizados há séculos devido seus efeitos de resfriamento do ambiente interno, oriundos das propriedades dos seus componentes (MINK, 2003). Constituem-se basicamente de uma estrutura de suporte (laje ou outro tipo de cobertura), drenagem, filtro, substrato e a vegetação, com espécies adequadas à tipologia do telhado verde e ao clima local.

A manutenção é essencial para todas as coberturas verdes, incluindo a poda e a irrigação. A irrigação deve ser ajustada às necessidades específicas da espécie vegetal escolhida, podendo até utilizar águas cinzas. (SUN; BOU-ZEID; NI, 2014; LOPES, 2007). Embora a irrigação tenha seus custos, Sun, Bou-Zeid e Ni (2014) afirmam que o investimento em ar-condicionado para ambientes com telhados não irrigados é comparável ao valor necessário para irrigar um telhado verde, além dos benefícios térmicos proporcionados por esse sistema. A precipitação pode reduzir esses custos de irrigação, porém ela é imprevisível e esporádica em regiões áridas e semiáridas, além da água ser rapidamente evaporada e escoada. Para telhados verdes nessas realidades climáticas, a irrigação é necessária para a sobrevivência da vegetação (MECHELEN; DUTOIT; HERMY, 2015).

Na fase de estabelecimento da vegetação é recomendada a irrigação, independente do clima local, após essa fase ela é necessária apenas em climas áridos e nos períodos secos dos climas temperados (MECHELEN; DUTOIT; HERMY, 2015). Enquanto Sailor (2008) recomenda um nível de irrigação de 6,0mm/dia (telhado verde com 10,0cm de substrato) durante o ano inteiro nos períodos em que a umidade relativa for abaixo de 40%, Mechelen, Dutoit e Hermy (2015) citam a limitação da irrigação aos períodos mais sensíveis à seca (estabelecimento e crescimento) e a delimitação do volume de água (abaixo da taxa de evapotranspiração) como estratégias de otimização do tratamento de irrigação. Wang *et al.* (2017) corroboram com ambos ao citar que a irrigação oportuna, realizada em dias e horários adequados às necessidades das plantas, pode melhorar o isolamento térmico, com efeitos mais perceptíveis nas primeiras duas horas após a irrigação.

Chagolla-Aranda *et al.* (2017) realizaram um estudo experimental na cidade de Cuernavaca, México, acerca dos efeitos da irrigação no desempenho térmico de telhados verdes em clima semi-quente. Após o evento de irrigação, a temperatura máxima nos componentes do telhado verde com a espécie *Aeonium subplanum* foi reduzida: 6,4°C na vegetação, 4,8°C no substrato e 1,3°C na laje, demonstrando a importância do conteúdo volumétrico de água como regulador da temperatura no telhado verde.

Jim e Peng (2012) citam que a quantidade de umidade no substrato é mais influente em ajustar o comportamento térmico do substrato do que na evapotranspiração e no resfriamento. Os mesmos autores ainda sugerem que o estudo dos efeitos da umidade no solo pode informar tratamentos de irrigação sustentáveis para os telhados verdes. Apesar disso, Mechelen, Dutoit e Hermy (2015) apontam que apenas 5% dos estudos sobre telhados verdes de sua revisão de literatura abordaram a irrigação e apenas um deles foi realizado na América Latina, sobretudo no Brasil (VIEIRA *et al.*, 2013). Diante disso, destaca-se a necessidade de estudos acerca da influência da irrigação/umidade em telhados verdes no Brasil, sobretudo em regiões áridas e semiáridas.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo foi analisar a influência da frequência de irrigação em telhado verde extensivo no comportamento higrotérmico do ar interno da edificação no período quente e seco de um clima tropical (As), na região do semiárido brasileiro, por meio de pesquisa experimental com células-teste.

3. MÉTODO

3.1. Área de estudo

As células-teste foram construídas em um canteiro experimental no *Campus* Arapiraca da Universidade Federal de Alagoas, na porção central estado de Alagoas, início da região do Semiárido alagoano. A cidade possui um clima categoria As, denominado tropical com estação seca de verão, conforme a classificação climática de Köppen (ALVARES *et al.*, 2013). Os dados climáticos locais apontam a existência de duas estações características: um verão quente e pouco chuvoso – quente e seco – de outubro a março, e um inverno mais ameno e chuvoso – quente e úmido – de abril a setembro (SILVA, 2019). A temperatura média mensal do ar varia entre 22,1 °C e 26,5 °C (amplitude térmica diária de 8 °C para os meses chuvosos e 12 °C para os meses secos). A umidade relativa média do ar varia entre 70% e 80%, podendo apresentar-se menor que 50% no período seco. A precipitação média anual é de 890,0 mm e os ventos são predominantes do quadrante Leste e possuem velocidade média entre 1,6 e 5,5m/s, vindos principalmente de leste e sudeste (SILVA; BARBOSA, 2022).

3.2. Células-teste

As células-teste foram construídas utilizando materiais convencionais (Figura 1). A cobertura possui inclinação de 20%, voltada para orientação Norte, composta por uma laje impermeabilizada com manta líquida na cor branca e espessura total de 12 cm. Sobre a laje foi instalado um “caixote vazado” de madeira com 20cm de altura interna com vistas a possibilitar espessura adequada de substrato para a instalação dos telhados verdes. As três células-teste utilizadas neste trabalho encontram-se dispostas linearmente no canteiro experimental, distantes 4m entre si, de forma a evitar barreiras à ventilação natural e sombreamento mútuo.

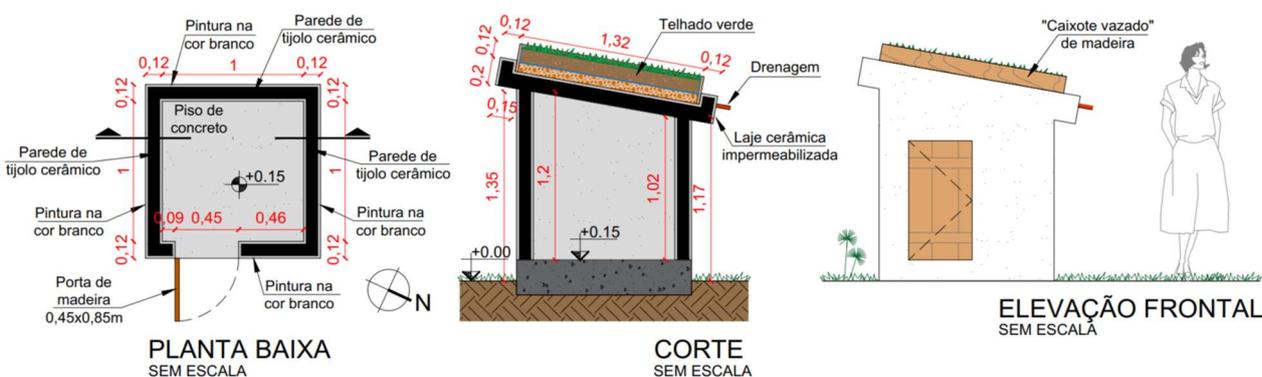


Figura 1 – Projeto das células-teste. Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

Foram instalados telhados verdes extensivos compostos de argila expandida (7cm), manta de jardim, substrato (10cm - valor médio para o sistema extensivo) composto de solo, areia e esterco caprino na proporção 2:1:1 [traço recomendado por Furtado (2019)]; e *Zoysia japonica*, espécie selecionada por apresentar rápida cobertura do solo, devido ao plantio ocorrer por tapetes pré-cultivados (Figura 2). Considerada uma planta de clima quente, pertence à família *Poaceae* (*Gramineae*), é uma herbácea, rizomatosa, reptante, perene, muito ramificada, com porte entre 10 e 15cm de altura, nativa do Japão (LORENZI; SOUZA, 2008).

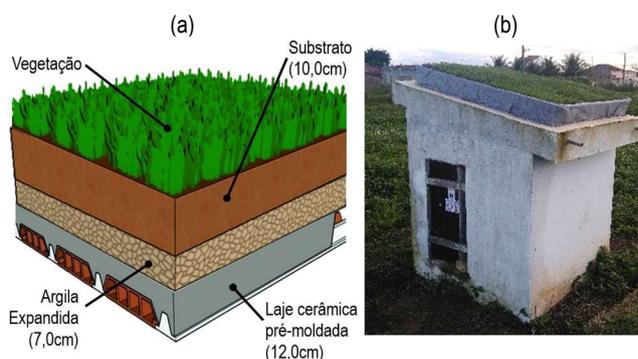


Figura 2 – (a) Composição do telhado verde. (b) Células-teste com telhado verde instalado. Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

3.3. Tratamentos de irrigação

Durante os 24 dias de estabilização da vegetação¹, os três telhados verdes receberam irrigação diária durante cinco dias na semana². Após esse período, iniciou-se a segunda etapa do experimento com três tratamentos distintos quanto à frequência de irrigação: (1) sem irrigação (TV1-SI), (2) irrigação semanal em um intervalo de sete dias (TV2-IS), e (3) irrigação diária (TV3-ID). Os tratamentos foram definidos com a finalidade de verificar os efeitos da vegetação em telhados verdes no comportamento térmico do ar no interior da edificação quando submetida à pouca ou nenhuma precipitação – situação característica do período quente e seco, no contexto climático em estudo.

Lima (2016) recomenda que a irrigação seja realizada no início da manhã ou no final da tarde para reduzir a evaporação da água e permitir que as plantas se “abasteçam” de água para o dia/período seguinte. Nos tratamentos com irrigação deste trabalho, a rega foi realizada no início da manhã (entre 7:30h e 8:00h), manualmente, em um volume aproximado de 10 litros de água por cobertura. Esse volume foi definido a partir de experimento *in loco* da quantidade de água que o telhado verde reteve em suas camadas antes do escoamento do excesso de água pelo sistema de drenagem (SILVA, 2020).

3.4. Campanha de monitoramento de dados

Para a campanha de monitoramento dos dados de temperatura do ar interno ($T_{a.in}$) e umidade relativa do ar interno ($U_{a.in}$) nas células-teste, foram utilizados *data loggers* HOBO® UX100-003 da ONSET® (Figura 3). O equipamento registra temperatura do ar em ambientes internos com uma faixa de precisão de $\pm 0,21^\circ\text{C}$ – para

¹ A estabilização da vegetação corresponde ao recobrimento de todo substrato pela cobertura vegetal.

² Devido à dificuldade de acesso ao canteiro experimental aos finais de semana, a rega ocorreu apenas de segunda a sexta-feira.

uma temperatura ambiente entre 0°C e 50°C – e umidade relativa do ar com precisão de $\pm 3,5\%$ para uma faixa de umidade relativa do ar entre 25% e 85%, e de $\pm 5,0\%$ para valores abaixo de 25% e acima de 85% de umidade relativa do ar (ONSET, 2023). Os equipamentos foram programados para totalizar os dados a cada 60min.

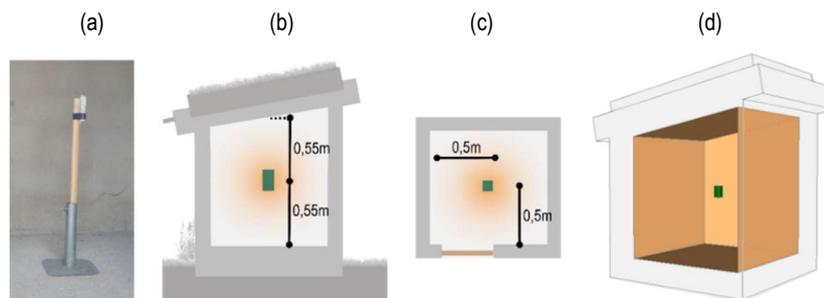


Figura 3 – (a) *Data logger* instalado para a coleta de dados; (b) e (c) posicionamento do equipamento em corte e planta baixa, respectivamente; e (d) esquema volumétrico da célula-teste com HOBO® UX100-003 no interior da célula-teste. Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

Apesar das células-teste serem idênticas do ponto de vista construtivo, foi realizado um período de monitoramento prévio durante três dias consecutivos (19 a 21 de junho de 2019) com vistas a equalizar e validar o experimento nas três células-teste. Procedimentos semelhantes foram utilizados por Osuna-Motta, Herrera-Cáceres e López-Bernal (2017), para verificar e validar comportamentos similares em células-teste. A partir do período-teste, observou-se que a temperatura do ar máxima apresentou desvio-padrão de 0,276, um pouco maior que o indicado pelo fabricante do equipamento ($\pm 0,21$) (Figura 4 e Tabela 1). Essa diferença poderia comprometer as análises a partir dos diferentes tratamentos de irrigação. Dessa forma, adotou-se uma célula-teste como referência (TV3), aplicando-se um fator de correção aos dados das duas outras células-teste (TV1 e TV2)³. Esse fator foi obtido a partir da diferença entre os valores médios horários da TV3 com os valores médios horários das células-teste TV1 e TV2. Os dados de $T_{a.in}$ e $U_{a.in}$ que serão apresentados nos resultados foram corrigidos a partir desse fator de correção.



Figura 4 – Células-teste no canteiro experimental. Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

Tabela 1 – Dados brutos e corrigidos de temperatura do ar (°C) e umidade relativa do ar (%) no interior das células-teste, no período de monitoramento prévio. Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

Célula-teste	DADOS BRUTOS						DADOS CORRIGIDOS					
	Temperatura do ar (°C)			Umidade relativa do ar (%)			Temperatura do ar (°C)			Umidade relativa do ar (%)		
	Mín.	Méd.	Máx.	Mín.	Méd.	Máx.	Mín.	Méd.	Máx.	Mín.	Méd.	Máx.
TV1	20,51	23,22	26,58	73,20	88,16	95,21	20,27	23,25	27,07	66,32	84,82	93,67
TV2	20,49	23,21	26,60	70,88	87,61	96,70	20,29	23,25	27,03	66,61	84,82	94,71
TV3	20,27	23,25	27,07	66,82	84,83	94,33	20,27	23,25	27,07	66,82	84,83	94,33
σ	0,131	0,020	0,276	3,232	1,784	1,196	0,009	0,000	0,024	0,249	0,009	0,527

3.4.1. Período de monitoramento

A campanha de monitoramento foi realizada na estação seca, durante 29 dias consecutivos (26 de janeiro a 23 de fevereiro de 2020). Os dados climáticos do local de estudo foram analisados a partir de dados horários de temperatura do ar externo ($T_{a.ex}$), umidade relativa do ar externo ($U_{a.ex}$), radiação solar global (Rad) e pluviosidade, registrados por estação meteorológica Davis® Vantage Pro2™ instalada no canteiro experimental, distante 9m das células-teste, com sensores posicionados a 1,5 m do solo.

As Figuras 5 e 6 apresentam os gráficos do comportamento da $T_{a.ex}$ e da $U_{a.ex}$, respectivamente, registrados no canteiro experimental durante a campanha de monitoramento. A partir dos dados, foram selecionados três dias típicos do período quente e seco, destacados no gráfico por caracterizar as diferentes fases dos tratamentos de irrigação: 26/01/2020 (início do experimento), 11/02/2020 (durante do experimento) e 23/02/2020 (término do experimento). Os três dias foram selecionados por apresentarem $T_{a.ex}$ acima ou bastante próxima à média das máximas para o mês correspondente; $U_{a.ex}$ abaixo ou bastante próxima à média das mínimas para o mês correspondente; radiação solar global indicando pouca nebulosidade; e ausência de precipitação, pelo menos no dia anterior.

³ Informações mais detalhadas sobre o fator de correção podem ser encontradas em Silva (2020).

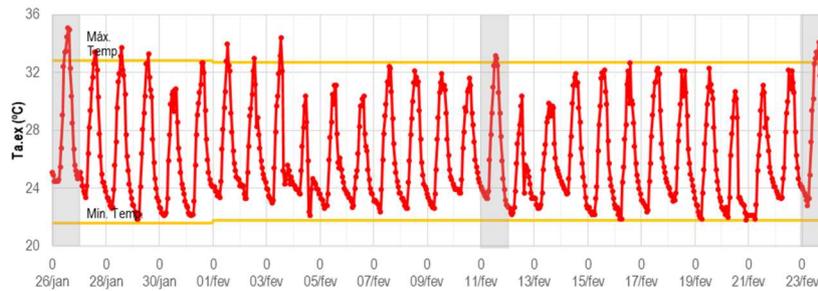


Figura 5 - Gráfico do comportamento da Ta.ex de 26/01/2020 a 23/02/2020 (linha pontilhada na cor vermelho) e médias das temperaturas mínimas e máximas diárias para os meses de janeiro e fevereiro (linha contínua na cor amarelo), de acordo com Silva (2019). Em cinza estão destacados os dias selecionados para análise. Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

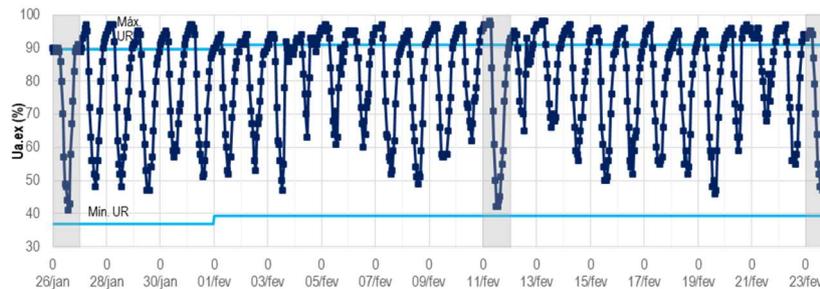


Figura 6 - Gráfico do comportamento da Ua.ex de 26/01/2020 a 23/02/2020 (linha pontilhada na cor azul escuro) e médias das umidades relativas mínimas e máximas diárias para os meses de janeiro e fevereiro (linha contínua na cor azul claro), de acordo com Silva (2019). Em cinza estão destacados os dias selecionados para análise. Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

Apesar dos elevados valores de Ta.ex e da reduzida Ua.ex registrados nos três dias selecionados, apenas a variação da umidade relativa do ar no dia 11 de fevereiro e a amplitude da temperatura do ar no dia 23 de fevereiro ficaram acima dos valores de variação e amplitude calculados a partir das médias mensais de cada mês (Tabela 2).

Tabela 2 - Valores máximos e mínimos diários registrados pela estação automática nos dias 26/01/2020, 11/02/2020 e 23/02/2020. Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

Parâmetro	26/01/2020		11/02/2020		23/02/2020		Média mensal JAN (SILVA, 2019)		Média mensal FEV (SILVA, 2019)	
	Ta.ex (°C)	Ua.ex (%)	Ta.ex (°C)	Ua.ex (%)	Ta.ex (°C)	Ua.ex (%)	Ta.ex (°C)	Ua.ex (%)	Ta.ex (°C)	Ua.ex (%)
Máxima	35,1	91,0	33,2	98,0	34,1	95,0	32,8	89,5	32,7	90,9
Mínima	24,5	41,0	23,3	42,0	22,8	47,0	21,6	36,9	21,8	39,4
Amplitude / Variação	10,6	50,0	9,9	56,0	11,3	48,0	11,2	52,9	10,9	51,5

Os dados de radiação solar dos dias 26 de janeiro, 11 e 23 de fevereiro de 2020 apresentaram picos de 1019,0W/m² (11h), 1074,0W/m² (13h) e 1050,0W/m² (11h), respectivamente. Apenas o dia 11/02/2020 não indica presença de nebulosidade, diferente dos outros dois que indicam presença das nuvens no comportamento gráfico da radiação, sobretudo entre 10h e 15h (Figura 7).

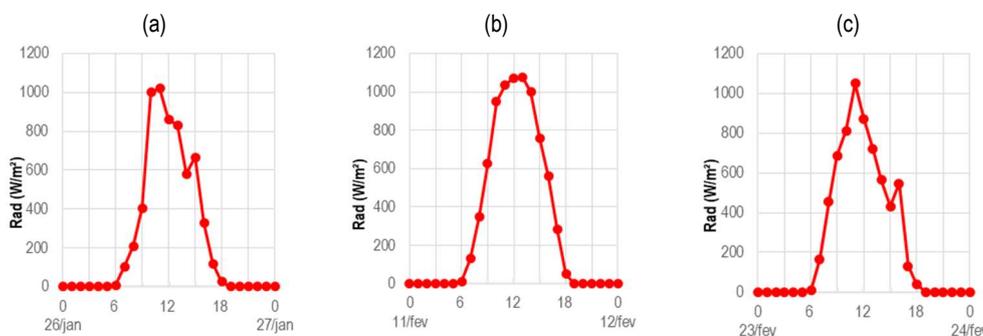


Figura 7 - Gráficos do comportamento da radiação solar global nos dias (a) 26/01/2020, (b) 11/02/2020 e (c) 23/02/2020. Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

Nos dias 26 de janeiro, 11 e 23 de fevereiro de 2020 não ocorreu precipitação, porém a estação meteorológica registrou precipitação acima de 1,00mm em alguns dias do período monitorado: 03, 04, 05, 12,

20 e 21 de fevereiro de 2020, com 35,81 mm, 22,10 mm, 4,58 mm, 6,10 mm, 12,19 mm e 1,52 mm de pluviosidade diária, respectivamente. Essa ocorrência de chuvas teve impacto no comportamento da vegetação, uma vez que alguns telhados verdes deveriam passar determinados dias sem receber água. Por outro lado, a alternância de dias com precipitação e ensolarados permitiu estudar o comportamento do telhado verde naturalmente. É importante destacar também que houve a coincidência de irrigação e precipitação, pois a primeira foi realizada no período da manhã e a chuva ocorreu a tarde, geralmente (Tabela 3).

Tabela 3 - Período de monitoramento com destaque para os tratamentos de irrigação (TV1-SI, TV2-IS e TV3-ID), dias de ocorrência de irrigação por tratamento (destacado em verde), ocorrência de chuva (destacado com ícone ) e dias típicos a serem analisados (destacados com borda preta). Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

Dia	D	S	T	Q	Q	S	S	D	S	T	Q	Q	S	S	D	S	T	Q	Q	S	S	D	S	T	Q	Q	S	S	D
Data	26/01	27/01	28/01	29/01	30/01	31/01	01/02	02/02	03/02	04/02	05/02	06/02	07/02	08/02	09/02	10/02	11/02	12/02	13/02	14/02	15/02	16/02	17/02	18/02	19/02	20/02	21/02	22/02	23/02
TV1-SI																													
TV2-IS																													
TV3-ID																													

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

As diferentes frequências de irrigação no período analisado tiveram efeito na aparência e desenvolvimento da *Zoysia japonica* (Figura 8). Apesar dessa reação da espécie vegetal ser esperada, a ausência de irrigação diária nos telhados verdes sem irrigação (TV1-SI) e irrigação semanal (TV2-IS) não foi severa devido à ocorrência de chuvas durante o período de monitoramento (Tabela 3).

A irrigação diária no TV3-ID permitiu adequado crescimento e desenvolvimento da vegetação, que manteve sua coloração esverdeada e seu estado saudável do início ao término da campanha de monitoramento. Os outros telhados verdes apresentaram crescimento vegetal reduzido e as folhas se tornaram murchas, secas e com coloração amarronzada, consequência do *déficit* de água. Apesar disso, houve manchas na coloração verde nessas coberturas, principalmente no TV2-IS (irrigação semanal), que são folhas murchas e não mortas (cor marrom), evidenciando a presença de água (irrigação ou precipitação) no período monitorado.



Figura 8 - Aparência inicial (27/01/2020) e final (27/02/2020) da cobertura vegetal nas células-teste durante o período de monitoramento. Fonte: Elaborado pelos autores, 2023

4.1. Temperatura do ar interno

Considerando o período total de monitoramento, os telhados verdes sem irrigação (TV1-SI), com irrigação semanal (TV2-IS) e diária (TV3-ID) apresentaram os valores 27,9°C, 27,7°C e 27,5°C de temperatura do ar interno ($T_{a.in}$) média para o período de 29 dias, respectivamente. Houve uma pequena redução de 0,4°C com a irrigação diária, valor considerável por ser maior que a precisão do equipamento ($\pm 0,21^\circ\text{C}$). Analisando o comportamento da $T_{a.in}$ nos dias típicos do período quente e seco apresentados nos gráficos da Figura 9, percebe-se que as diferenças são pequenas entre os três tratamentos de irrigação. Os dados do último dia de monitoramento (23/02/2020) representam o efeito final dos tratamentos de irrigação, portanto foram calculadas as diferenças entre a temperatura do ar interno ($T_{a.in}$) e os valores de temperatura do ar externo ($T_{a.ex}$) desse dia (Tabela 4 e Figura 10).

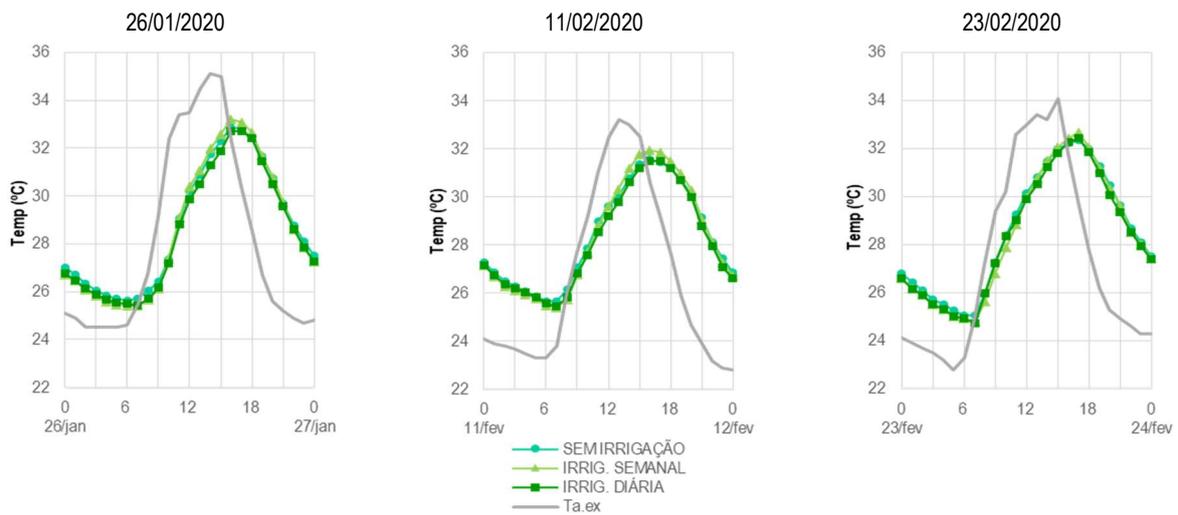


Figura 9 - Gráficos do comportamento da temperatura do ar interno (Ta.in) nos telhados verdes com diferentes tratamentos de irrigação nos dias 26/01/2020, 11/02/2020 e 23/02/2020, respectivamente, comparada à temperatura do ar externo (Ta.ex - linha contínua na cor cinza). Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

Tabela 4 - Diferenças entre os valores da temperatura do ar interno (Ta.in) nos telhados verdes com diferentes tratamento de irrigação e a temperatura do ar externo (Ta.ex) do dia 23/02/2020. As maiores diferenças positivas e negativas estão destacadas nas cores amarelo e verde, respectivamente. Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

DIA / HORA	23 FEV																								24 FEV
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	0
TV1-SI	2,71	2,52	2,38	2,21	2,34	2,48	1,77	0,14	-1,21	-2,12	-1,80	-3,33	-2,84	-2,60	-1,72	-2,12	0,42	2,55	4,26	5,09	5,16	4,75	4,08	3,79	3,22
TV2-IS	2,50	2,29	2,22	2,00	2,09	2,22	1,63	-0,09	-1,55	-2,61	-2,32	-3,76	-3,03	-2,64	-1,68	-2,03	0,62	2,89	4,35	5,00	5,06	4,76	3,92	3,72	3,11
TV3-ID	2,48	2,24	2,20	2,03	2,11	2,22	1,62	-0,17	-1,21	-2,16	-1,85	-3,60	-3,13	-2,90	-1,99	-2,28	0,49	2,64	4,15	4,78	4,77	4,47	3,90	3,63	3,09

A maior redução (3,76°C) da Ta.ex ocorreu às 11h quando o telhado verde com irrigação semanal (TV2-IS) se destacou, enquanto o telhado verde sem irrigação obteve o maior aumento da Ta.ex no período noturno (5,16°C às 20h) e foi próximo ao telhado verde com irrigação semanal (5,06°C). Quando esses valores são visualizados graficamente, observa-se que as diferenças entre eles são próximas à precisão do equipamento durante praticamente todo o dia monitorado (23/02/2020), embora, às 10h, ela tenha atingido 0,52°C e 0,47°C, quando o telhado verde com irrigação semanal é comparado ao sistema sem irrigação e à irrigação diária, respectivamente. A maior diferença entre as coberturas com irrigação diária e sem irrigação foi de 0,39°C (20h) no período noturno, mas não ultrapassou 0,29°C (12h) durante o período diurno.

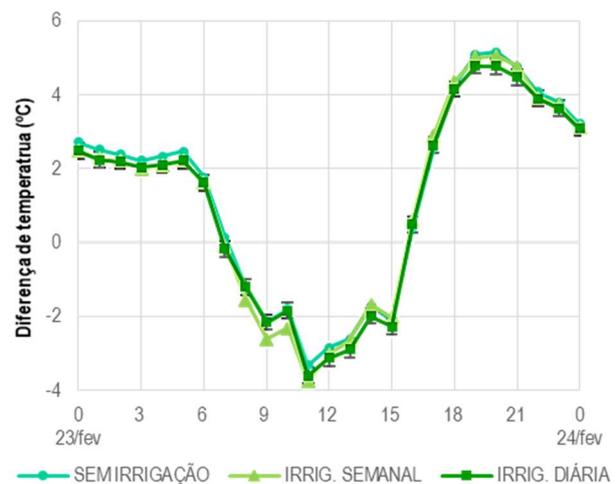


Figura 10 - Comportamento gráfico das diferenças entre os valores da temperatura do ar interno (Ta.in) com dos telhados verdes e a temperatura do ar externo (Ta.ex) do dia 23/02/2020, com destaque da faixa de precisão do equipamento ($\pm 0,21^\circ\text{C}$) no gráfico do telhado verde com irrigação diária (TV3-ID).

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

Chagolla-Aranda *et al.* (2017) encontraram diferenças maiores que 1,0°C na laje com telhado verde após o fenômeno de irrigação, porém os autores analisaram temperaturas superficiais e não valores internos de temperatura do ar. Por meio de simulação computacional, Pianella *et al.* (2017) encontraram comportamentos semelhantes entre um telhado verde com 20cm de substrato e um telhado verde com 15cm não irrigado, além de pequenas diferenças quando a irrigação é frequente e a vegetação espaçada. Uma tendência importante foi verificada no experimento de Liz (2016), no qual o comportamento das curvas de fluxo de calor tende a se aproximar ao longo do tempo em uma cobertura com substrato úmido e outra com substrato seco, resultado da absorção de umidade na amostra seca e a evaporação da água na amostra úmida.

Os parâmetros calculados para os três dias típicos apresentam o telhado verde sem irrigação (TV1-SI) com a menor amplitude térmica e mais eficiente na redução das mínimas $T_{a.in}$, pois apresenta os maiores amortecimentos térmicos das mínimas e as maiores mínimas nos dias analisados. Já o telhado verde com irrigação diária (TV3-ID) se destacou na redução das máximas $T_{a.in}$ com o maior amortecimento térmico dos valores máximos de temperatura do ar. Quanto ao atraso térmico, pode-se considerar que não sofreu alteração oriunda dos tratamentos de irrigação (Tabela 5). Apesar desses destaques, as diferenças entre os parâmetros calculados são menores ou muito próximas à precisão do equipamento.

Tabela 5 - $T_{a.in}$ máxima, mínima, amplitude térmica, amortecimento térmico e atraso térmico nos dias 26/01/2020, 11/02/2020 e 23/02/2020. Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

DIA	TRATAMENTO DE IRRIGAÇÃO	$T_{a.in}$ (°C)		ΔT Amplitude Térmica (°C)	μ Amortecimento Térmico (°C)		ϕ Atraso Térmico (h)	
		Máx.	Mín.		Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
26/JAN	Sem irrigação	32,8	25,6	7,2	-2,3	1,1	2	4
	Irrig. semanal	33,2	25,4	7,8	-1,9	0,9	2	5
	Irrig. diária	32,7	25,4	7,3	-2,4	0,9	2	5
	$T_{a.ex}$	35,1	24,5	10,6	-	-	-	-
11/FEV	Sem irrigação	31,5	25,6	5,9	-1,7	2,8	3	2
	Irrig. semanal	31,9	25,4	6,5	-1,3	2,6	3	2
	Irrig. diária	31,5	25,4	6,1	-1,7	2,6	3	2
	$T_{a.ex}$	33,2	23,3	9,9	-	-	-	-
23/FEV	Sem irrigação	32,5	25,0	7,5	-1,6	2,2	2	2
	Irrig. semanal	32,7	24,8	7,9	-1,4	2,0	2	2
	Irrig. diária	32,4	24,7	7,7	-1,7	1,9	2	2
	$T_{a.ex}$	34,1	22,8	11,3	-	-	-	-

4.2. Umidade relativa do ar interno

Os valores médios de umidade relativa do ar interno ($U_{a.in}$) foram maiores no telhado verde com irrigação diária (TV3-ID), seguidos da cobertura com irrigação semanal (TV2-IS) e do telhado sem irrigação (TV1-SI), com valores 72,5%, 69,6% e 68,0%, respectivamente. De maneira geral, o comportamento foi coerente com a frequência de irrigação, que permitiu o aumento da umidade relativa do ar no interior das células-teste. Apesar disso, o aumento de 4,5% na $U_{a.in}$ provocado pela irrigação diária é próximo à precisão do equipamento ($\pm 3,5\%$). O comportamento dessa variável nos três dias típicos do período quente e seco (Figura 11) apresenta pequenas diferenças gráficas entre as coberturas com telhado verde.

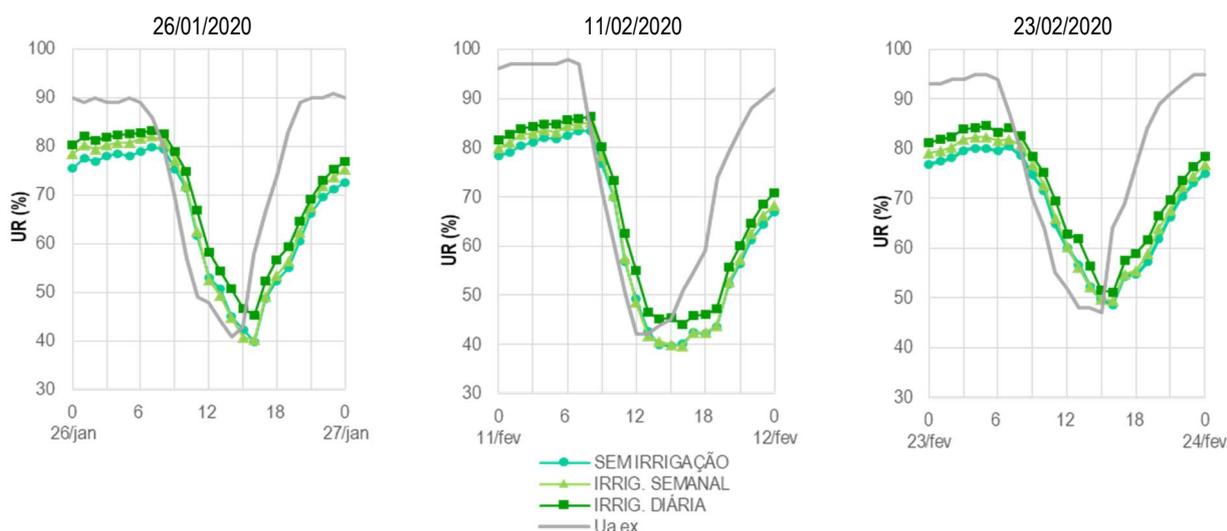


Figura 11 - Gráficos do comportamento da umidade relativa do ar interno ($U_{a.in}$) nos telhados verdes com diferentes tratamentos de irrigação nos dias 26/01/2020, 11/02/2020 e 23/02/2020, respectivamente, comparada à umidade relativa do ar externo ($U_{a.ex}$ - linha contínua na cor cinza). Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

A Tabela 6 e a Figura 12 apresentam as diferenças entre a umidade relativa do ar interno ($U_{a.in}$) e os valores externos de umidade relativa do ar ($U_{a.ex}$) para o último dia de monitoramento (23/02/2020). O maior aumento da $U_{a.in}$ ocorreu às 11h, no qual o telhado verde com irrigação diária (TV3-ID) se destacou com o maior valor (14,5%), enquanto o telhado verde sem irrigação (TV1-SI) apresentou a maior redução da $U_{a.ex}$

no período noturno (27,1%). Quando essas diferenças são comparadas à precisão do equipamento, valores significativos são encontrados comparando irrigação diária com a cobertura sem irrigação. As diferenças entre esses dois tratamentos de irrigação são maiores que 3,5% durante boa parte do monitoramento (madrugada, manhã, início da tarde e início da noite), chegando a 5,2% às 12h.

As maiores máximas e mínimas de umidade relativa do ar interno (Ua.in) foram registradas no telhado verde com irrigação diária (TV3-ID), enquanto os menores valores foram observados na cobertura que teve a rega totalmente suspensa (TV1-SI). Quanto à variação de umidade (ΔU) no final do monitoramento, o TV1-SI apresentou o menor valor desse parâmetro, conforme apresentam os dados da Tabela 7. Embora isso tenha ocorrido, as diferenças entre os valores de cada cobertura são menores ou muito próximas aos limites de precisão do equipamento, similarmente ao que aconteceu na temperatura do ar interno (Ta.in).

Tabela 6 - Diferenças entre os valores da umidade relativa do ar interno (Ua.in) nos telhados verdes com diferentes tratamento de irrigação e a umidade relativa do ar externo (Ua.ex) do dia 23/02/2020. As maiores diferenças positivas e negativas estão destacadas nas cores amarelo e verde, respectivamente. Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

DIA / HORA	23 FEV																							24 FEV	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	0
TV1-SI	-16,1	-15,5	-15,8	-14,3	-14,8	-15,0	-14,3	-6,5	-0,3	4,7	7,6	9,8	8,1	8,7	4,2	2,7	-15,4	-14,7	-22,3	-26,8	-27,1	-24,7	-22,6	-21,9	-19,9
TV2-IS	-13,7	-13,4	-13,7	-12,1	-12,5	-12,6	-12,2	-5,0	1,8	6,9	8,7	11,2	8,3	8,2	4,2	2,7	-14,5	-14,2	-21,6	-25,2	-25,0	-23,5	-20,4	-20,5	-18,2
TV3-ID	-11,8	-11,0	-11,6	-10,1	-10,8	-10,2	-10,6	-2,7	3,6	8,4	11,2	14,5	10,9	13,9	8,4	4,7	-12,9	-11,4	-18,1	-22,2	-22,5	-21,2	-19,3	-18,6	-16,6

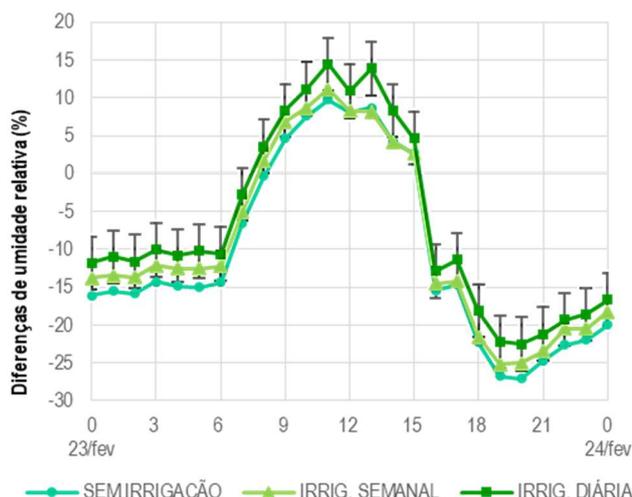


Figura 12 - Comportamento gráfico das diferenças entre os valores de umidade relativa do ar interno (Ua.in) com dos telhados verdes e a umidade relativa do ar externo (Ua.ex) do dia 23/02/2020, com destaque da faixa de precisão do equipamento ($\pm 3,5\%$) no gráfico do telhado verde com irrigação diária (TV3-ID).

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

Tabela 7 - Ua.in máxima, Ua.in mínima e variação de umidade nos dias 26/01/2020, 11/02/2020 e 23/02/2020. Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

DIA	TRATAMENTO DE IRRIGAÇÃO	Ua.in (%)		ΔU Variação de Umidade
		Máx.	Mín.	
26/JAN	Sem irrigação	79,9	39,9	40,0
	Irrig. semanal	82,0	40,2	41,8
	Irrig. diária	83,4	45,4	38,0
	Ua.ex	91,0	41,0	50,0
11/FEV	Sem irrigação	83,4	39,5	43,9
	Irrig. semanal	85,2	39,6	45,6
	Irrig. diária	86,4	43,9	42,5
	Ua.ex	98,0	42,0	56,0
23/FEV	Sem irrigação	80,4	48,6	31,8
	Irrig. semanal	82,4	49,4	33,0
	Irrig. diária	84,7	51,1	33,6
	Ua.ex	95,0	47,0	48,0

5. CONCLUSÕES

De maneira geral, as diferenças na temperatura do ar interno (Ta.in) e na umidade relativa do ar interno (Ua.in) oriundas da frequência de irrigação dos telhados verdes são pequenas e próximas à faixa de precisão do equipamento, embora os valores médios de temperatura e umidade relativa do ar tenham sido coerentes com a quantidade de água que cada cobertura recebeu, considerando todos os 29 dias monitorados. Nos valores médios para todo o período, a cobertura com irrigação diária (TV3-ID) reduziu 0,4°C sua Ta.in e aumentou 4,5% a Ua.in, quando comparada à cobertura que teve rega totalmente suspensa (TV1-SI). Os parâmetros calculados para os três dias típicos confirmam o comportamento dos dados apresentados nos gráficos, com diferenças entre os tratamentos de irrigação que são próximas aos limites de precisão do equipamento.

Assim, pode-se concluir que a rega teve maior influência no grau de umidade relativa no interior da célula-teste, embora a análise das umidades relativas, fornecidas em valores relativos (porcentagem), tenha sido dificultada pela ausência de estudos semelhantes na literatura, uma vez que as pesquisas que abordam umidades em telhados verdes referem-se ao conteúdo volumétrico nas camadas do sistema, principalmente no substrato, e não são apresentados em valores relativos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507
- CHAGOLLA-ARANDA, M.A.; SIMÁ, E.; XAMÁN, J.; ALVAREZ, G.; HERNÁNDEZ-PÉREZ, I.; TÉLLEZ-VELÁZQUEZ, E. Effect of irrigation on the experimental thermal performance of green roof in a semi-warm climate in Mexico. **Energy and Buildings**, v. 154, p. 232-243, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.082>.
- FURTADO, Daniela Cavalcanti de Medeiros. **Traço para substrato em telhado verde** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <wellington-souza94@hotmail.com> em 28 de junho de 2019.
- JIM, C.Y.; PENG, Lilliana L.H. Substrate moisture effect on water balance and thermal regime of a tropical extensive green roof. **Ecological Engineering**, v. 47, p. 9-23, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.06.020>.
- LIMA, Luiz Paulo Fernandes. **A física da irrigação**. Pau dos Ferros, RN: Universidade Federal do Ceará, 2016. 88p. Disponível em: <<https://memoria.ifrn.edu.br/bitstream/handle/1044/931/Produto%20Final%20-%20LIMA%2C%20L.P.F.%202016%20%28A6%29%20-%20ATUALIZADA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 30 mar. 2023.
- LIZ, Débora Gracielle Stiegemeier de. **Análise experimental do comportamento térmico do telhado extensivo para Florianópolis**. 2016. 113 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/172358>>. Acesso em: 01 abr. 2023.
- LOPES, Daniele Arantes Rodrigues. **Análise do comportamento térmico de uma cobertura verde leve (CVL) e diferentes sistemas de cobertura**. 2007. 145 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-11122007-093813/pt-br.php>>. Acesso em: 31 mar. 2023.
- LORENZI, Harri; SOUZA, Hermes Moreira de. **Plantas ornamentais no Brasil**: arbustivas, herbáceas e trepadeiras. 4. ed. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum, 2008.
- MECHELEN, Carmem Van; DUTOIT, Thierry; HERMY, Martin. Adapting green roof irrigation practices for a sustainable future: a review. **Sustainable Cities and Society**, v. 19, p. 74-90, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2015.07.007>.
- MINK, Gernot. **Techos verdes**: planificación, ejecución, consejos prácticos. Montevideo. Fin de Siglo, [2003?]. 86p.
- ONSET. HOBO® Temp/RH 3.5% Data Logger (UX100-003) Manual. Disponível em: <<https://www.onsetcomp.com/support/manuals/16209-f-ux100-003-manual>>. Acesso em: 01 abr. 2023.
- OSUNA-MOTTA, Iván; HERRERA-CACERES, Carlos; LÓPEZ-BERNAL, Oswaldo. Techo plantado como dispositivo de climatización pasiva en el trópico. **Revista de Arquitectura**, Bogotá, v. 19(1), p. 42-55, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.14718/RevArq.2017.19.1.1109>.
- PIANELLA, Andrea; AYE, Lu; CHEN, Zhengdong; WILLIAMS, Nicholas S. G. Substrate depth vegetations and irrigation affect green roof performance in a Mediterranean Type Climate. **Sustainability**, v. 9, 1451, 2017. DOI: 10.3390/su9081451.
- SAILOR, D. J. A green roof model for building energy simulation programs. **Energy and Buildings**, v. 40, p.1466-1478, fev. 2008. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.02.001.
- SILVA, M. F. da; BARBOSA, R. V. R. Regime de ventos em cidades de diferentes regiões geográficas de Alagoas a partir de dados meteorológicos recentes. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S. l.], v. 31, n. 18, p. 509–538, 2022. DOI: 10.55761/abclima.v31i18.15606.
- SILVA, Mônica Ferreira da. **Estratégias bioclimáticas para seis cidades alagoanas: contribuições para a adequação da arquitetura ao clima local**. 2019. 185 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo: Dinâmicas do Espaço Habitado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2019.
- SILVA, Wellington Souza. **Desempenho do sistema de telhado verde como estratégia de condicionamento térmico passivo no semiárido alagoano**. 2020. 204 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo: Dinâmicas do Espaço Habitado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2020.
- SUN, Ting; BOU-ZEID, Elie; NI, Guang-Heng. To irrigate or not to irrigate: analysis of green roof performance via a vertically resolved hygrothermal model. **Building and Environment**, v. 73, p. 127-237, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.12.004>.
- VIEIRA, N. L.; DE QUEIROZ, T. M.; FAGUNDES, M. C.; DALLACORT, R. Potencial of utilization of rainwater excess for irrigation of green roof in Mato Grosso, Brasil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 33, p. 857-864. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162013000400024>.
- WANG, Yajun; SINGH, Rajendra Prasad; FU, Dafang; ZHANG, Junyu; SHOU, Frang. Thermal study on extensive green roof integrated irrigation in northwestern arid regions of China. **Water**, v. 19, 810, 2017. DOI: 10.3390/w9110810.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.