

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UM SISTEMA DE COBERTURA VERDE UTILIZANDO PLATAFORMAS DE TESTE

ANALYSIS OF THERMAL BEHAVIOR OF A GREEN ROOF SYSTEM USING TEST PLATFORMS

Rafael Perussi ¹

Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil, rafaelperussi@usp.br

Francisco Arthur da Silva Vecchia ²

Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil, fvecchia@sc.usp.br

Resumo

O objetivo desta pesquisa é analisar experimentalmente o comportamento térmico de um sistema extensivo de cobertura verde em comparação com uma cobertura controle sem vegetação. O experimento foi composto por duas plataformas de teste reproduzindo um sistema de cobertura verde extensivo, sendo que uma plataforma recebeu o plantio de grama-amendoim e a outra foi mantida sem cobertura vegetal. Foram monitoradas as temperaturas dos níveis superior e inferior do substrato e as temperaturas externas, abaixo das plataformas, por meio de termopares. Os dados climáticos foram registrados por uma estação meteorológica automática e as análises do comportamento térmico foram realizadas a partir das abordagens da Climatologia Dinâmica. A cobertura verde apresentou melhor desempenho térmico em relação à cobertura controle por ter apresentado maior atraso térmico entre as superfícies superior e inferior, menor amplitude térmica nas superfícies e temperaturas máximas menores do que a temperatura máxima do ar. Concluiu-se que, para um dia quente e seco, a vegetação influencia os processos de troca de calor no perfil do substrato pelo bloqueio da radiação solar incidente, permitindo que a superfície superior não atinja temperaturas acima da temperatura máxima do ar diária e também que esta temperatura se manifeste com maior atraso na superfície inferior.

Palavras-chave: Cobertura verde. Comportamento térmico. Climatologia.

Abstract

The aim of this study is to analyze experimentally the thermal behavior of an extensive green roof system compared to a control system. The experiment consisted of two test platforms built to reproduce an extensive green roof system; one of which perennial peanut was grown and the other one was maintained without vegetation. The temperatures of the upper and lower levels of the substrate and external temperatures below the base of the platforms were monitored by means of thermocouples. The climatic variables were recorded by the automatic weather station and the analysis of the thermal behavior was based on the approaches of dynamic climatology. The green roof showed better thermal performance compared to control coverage by having larger thermal lag between the upper and lower surfaces, the lower temperature range on surfaces and lower maximum temperatures than the maximum air temperature. It was concluded that for a hot, dry day a dense vegetation cover influences the heat exchange process in the substrate layer by blocking the solar radiation, allowing the upper surface does not reach temperatures above the maximum daily air temperature and also that this temperature be registered with higher delay at the bottom surface.

Keywords: Green roof. Thermal behavior. Climatology.

How to cite this article:

PERUSSI, Rafael; VECCHIA, Francisco Arthur da Silva. Análise do comportamento térmico de um sistema de cobertura verde utilizando plataformas de teste. *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção*, Campinas, SP, v. 7, n. 4, p. 225-236, dez. 2016. ISSN 1980-6809. Disponível em: <<http://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8647932>>. Acesso em: 12 maio 2017. doi:<http://dx.doi.org/10.20396/parc.v7i4.8647932>.

Introdução

A crescente atenção dada às questões ambientais e a consequente busca de um desenvolvimento sustentável por parte das sociedades atuais tem acentuado as preocupações relacionadas com os impactos associados à transformação do ambiente natural em ambiente construído. Este tipo de preocupação surge como consequência da expansão dos grandes centros urbanos que, aumentando em área e em densidade populacional, aumentam a concentração de estruturas construídas e reduzem os seus espaços verdes, provocando uma maior pressão nos recursos naturais existentes, a perda de biodiversidade e a diminuição da qualidade de vida dos seus habitantes.

As cidades mais compactas ou cujo planejamento não contemplou as áreas verdes, não conseguem se beneficiar das vantagens destes espaços. Uma das soluções para este problema parte do melhor aproveitamento das coberturas dos edifícios, adicionando-lhes vegetação, aumentando assim a área verde urbana, permitindo usufruir de todas as vantagens que lhe estão associadas, como a regulação da temperatura do ambiente interno, o atraso no escoamento das águas pluviais e o aumento da vida útil da estrutura da cobertura (SUSCA; GAFFIN; DELL'OSSO, 2011).

As coberturas verdes são sistemas construtivos utilizados na cobertura de edificações, que consistem na sobreposição de diversas camadas sobre uma superfície estrutural, que de modo geral incluem: membrana a prova de água (impermeabilização), sistema de drenagem, substrato (meio de crescimento da vegetação) e plantas.

A denominação desse sistema construtivo, atualmente, varia em diversas regiões, sendo descrito como telhado verde (DUNNETT; KINGSBURY, 2008; DURHMAN; ROWE; HUGH, 2007; PLEDGE, 2005), telhado vegetado (EMILSSON, 2005) ou cobertura verde leve (CVL) (VECCHIA, 2005). Em geral, os telhados verdes atuais são formados por diversas camadas sobrepostas sobre um suporte estrutural, contendo vegetação tolerante às condições do ambiente, solo de espessura variável, material drenante, barreira contra raízes e componente impermeabilizante. As coberturas verdes podem ser classificadas como “extensivas” ou “intensivas”. As coberturas verdes extensivas apresentam substrato com espessura de 0,02 a 0,20 m e o peso pode variar entre 60 e 170 kg/m², requerem pouca irrigação e possuem baixa manutenção (IGRA, 2016; OBERNDORFER et al., 2007). Nas coberturas verdes intensivas as cargas na estrutura giram em torno de 150 a 500 kg/m² para alturas totais que variam entre os 0,20 e 0,40 m, podendo ultrapassar este valor, dependendo da escolha das espécies de vegetação e a estrutura sobre a qual é instalada. Devido à diversidade que apresentam, coberturas desse tipo favorecem a criação de ecossistemas mais complexos, contribuindo para o aumento da biodiversidade (PECK et al., 1999).

Segundo Vecchia (2003), os estudos relacionados com o desempenho térmico de coberturas verdes possuem o objetivo de obter benefícios energéticos e melhora no conforto térmico do ambiente construído.

Uma das vantagens que a cobertura verde proporciona é a atenuação das temperaturas nos ambientes internos às edificações devido ao efeito de inércia térmica, referente aos elementos do sistema construtivo. Assim, ocorre um atraso na transmissão do fluxo de calor proveniente da radiação solar.

A diferença no processo de transferência de calor das coberturas vegetadas e das sem vegetação é qualitativa e quantitativa. As plantas, para as suas funções biológicas como a fotossíntese, transpiração e evaporação, absorvem uma quantidade significativa de radiação solar. Em função disso, reduz-se a transferência de calor por condução e convecção ao ambiente interno (NIACHOU et al., 2001).

O Brasil possui quase que a totalidade de seu território sujeita a intensa insolação durante a maior parte do ano. Por este motivo, a cobertura deveria ser o elemento com maior proteção térmica, em edificações de baixa altura. Neste sentido, fica evidente a importância do conhecimento das condições climáticas, pois podem inferir em padrões de ocupação territorial, na concepção de projetos arquitetônicos, e até mesmo auxiliar em processos de tomada de decisão em diversos aspectos ambientais (FREITAS, 2005; CUNHA; VECCHIA, 2007).

A abordagem climática adotada no presente estudo para definir o período de análise dos dados meteorológicos e dos valores monitorados, baseia-se nos critérios da Climatologia Dinâmica. Nessa perspectiva, o que diferencia os episódios são a intensidade e duração de cada massa de ar sobre o local. Assim, compreende-se à ação das massas de ar sobre uma determinada região, bem como suas repercussões no ambiente construído. Para isso, a coleta dos dados de radiação solar global e dos elementos do clima é de fundamental importância para análise dos processos atmosféricos, que acontecem de forma sucessiva, encadeada e inter-relacionada, configurando o ritmo climático, não se esquecendo de considerar os fatores geográficos de modificação. Após a análise do episódio representativo do fato climático, pode-se eleger um dia representativo das ocorrências climáticas, para visibilidade do objeto de estudo (VECCHIA, 1997).

A possibilidade de adotar a abordagem dinâmica do clima oferece, em um curto intervalo de tempo, subsídios para o entendimento das condições climáticas e possíveis repercussões sobre o ambiente construído, com relação à conservação de energia e ao comportamento e desempenho térmicos de edifícios (SEIXAS, 2015).

A maioria dos estudos relativos às coberturas verdes no Brasil abordam aspectos relacionados à retenção das águas pluviais (COSTA; COSTA; POLETO, 2012; MILLER; 2014; MORUZZI; MOURA; BARBASSA, 2014; BERRETTA; POË; STOVIN, 2014) e o desempenho térmico proporcionado pelos sistemas de cobertura verde utilizando protótipos de alvenaria em escala (MORAIS, 2004; LOPES, 2007; JIM; TSANG, 2011).

Nesse contexto, o presente trabalho buscou mensurar o quanto a presença da vegetação em uma cobertura verde extensiva contribui para a redução das oscilações da temperatura no perfil do substrato frente à ação da radiação solar e às oscilações da temperatura do ar, comparado a uma cobertura sem vegetação. Assim, o presente estudo tem por objetivo analisar o comportamento em relação ao atraso térmico proporcionado pelo conjunto planta-solo em um sistema extensivo de cobertura verde. A análise foi realizada durante o período de calor, na transição primavera-verão, em uma região de clima tropical de altitude no Estado de São Paulo, visando a sua aplicação em edificações.

Fundamentação

Uma cobertura verde é uma estrutura em camadas. A membrana de impermeabilização fica imediatamente sobre a plataforma estrutural do telhado para evitar a entrada de umidade na edificação. Acima desta membrana, há uma camada de drenagem, a qual é projetada para transportar o excesso de escoamento e, em alguns sistemas, armazena água para as plantas em períodos de seca. Em seguida, uma camada filtrante é instalada para evitar o carregamento de partículas do substrato que comprometam o sistema de drenagem do telhado. Por fim, o substrato e a vegetação completam a cobertura verde (OLIVEIRA, 2012).

Johnston e Newton (2004) sugerem que as plantas utilizadas nas coberturas verdes sejam preferencialmente nativas, adaptadas ao clima local, de crescimento rasteiro, que tenham maior área foliar, raízes curtas, que demandem menor manutenção em termos de rega e poda e que apresentem elevada capacidade de resistência a estresses climáticos. As espécies do gênero *Arachis* estão entre as plantas recomendadas para uso em coberturas verdes no trabalho conduzido por Yok e Sia (2008). Comumente denominada de amendoim forrageiro, a *Arachis pintoi* é uma planta originária do Brasil, que apresenta boa adaptação em áreas de alta precipitação, com solos de moderada fertilidade e com restrições à seca e encharcamento demorado. Encontra-se difundida nas zonas tropicais e subtropicais do Brasil e do mundo. Por ser ainda uma leguminosa perene, age como fixadora de nitrogênio e controla plantas invasoras (BAPTISTA; MORETINI; MARTINEZ, 2007).

Os estudos relacionados ao desempenho térmico de coberturas verdes possuem o objetivo de obter benefícios energéticos e melhora no conforto térmico do ambiente construído.

O fato dos sistemas de cobertura verde serem diferentes dos convencionais, devido à presença de substrato, vegetação e água, torna necessária a compreensão dos processos de armazenamento e troca de calor, que podem ocorrer sob várias formas. Os processos de transferência de calor no solo podem ocorrer por condução e convecção, com ou sem transferência de calor latente. A temperatura do solo é consequência desses processos e das trocas de calor entre a superfície do solo com a atmosfera (PREVEDELLO, 1996).

No caso das coberturas verdes as trocas de calor por convecção ocorrem pela água e pelo ar presentes no substrato e também através do efeito do vento em contato com a cobertura.

Dado que as temperaturas e a radiação solar seguem padrões diários cíclicos dependentes da latitude e da altitude, as condições térmicas de uma edificação seguem esses mesmos padrões, dependendo também dos materiais que as constituem, os quais irão modificar sobretudo as variações da amplitude entre as temperaturas máximas e mínimas (GIVONI, 1976). Uma cobertura que apresente um grande atraso térmico revela-se um bom elemento acumulador de calor e conseqüentemente uma boa solução de isolamento térmico (SANTOS, 2012).

Para avaliar o potencial de uso de espécies vegetais para uso em coberturas verdes, Beatrice (2011) realizou um trabalho durante o verão em Itirapina-SP e verificou que substratos de menor espessura são mais dependentes da cobertura foliar para minimizar seu aquecimento.

Em um trabalho conduzido durante o verão, na Inglaterra, Blanus *et al.* (2013) puderam concluir que a utilização de um sistema de cobertura verde formado por substrato com espessura mínima de 0,10 m, vegetação com folhagem densa e irrigação periódica se justifica pelo melhor desempenho na redução da temperatura nas camadas de substrato abaixo da vegetação, devido à maior refletância da radiação pela camada foliar e à maior taxa de transpiração, ao invés da utilização de substratos mais rasos e vegetação tolerante à seca, mas que possuem taxas de transpiração reduzidas e folhagem esparsa, as quais permitem maior exposição do substrato à radiação.

Resultados semelhantes também foram obtidos por Coutts *et al.* (2013), durante a primavera e o verão australiano, no qual sugerem que coberturas verdes irrigadas periodicamente fornecem melhores benefícios em termos de desempenho térmico e de retenção de umidade no substrato, do que se forem utilizadas regime de irrigação limitado, assim como evitar a exposição do substrato que,

devido ao albedo reduzido, absorve mais essa radiação e também retém menos umidade.

Método

Delineamento experimental

O experimento foi composto por duas plataformas de teste construídas de forma a simular um sistema de telhado verde extensivo nas quais foram instalados conjuntos de sensores conectados a um sistema de aquisição de dados. O sistema permitiu registrar a evolução temporal dos parâmetros necessários ao estudo do comportamento térmico. Ambas as plataformas foram preenchidas com substrato composto por uma mistura de turfa com carvão vegetal e de solo do local do experimento, sendo que somente uma recebeu o plantio de vegetação, denominada “Plataforma Verde” e a outra foi mantida sem vegetação, denominada “Plataforma Controle”, a qual simula o comportamento térmico de um solo exposto. Foram monitoradas as temperaturas do nível superior e inferior do substrato e também as temperaturas externas abaixo da base das plataformas.

As análises do comportamento térmico foram realizadas a partir das abordagens espacial e temporal da Climatologia Dinâmica, que permite visualizar fenômenos de caráter temporal mais exíguo, como a identificação do ritmo climático expresso pelo regime de chuvas, pelos períodos de elevada secura do ar, ou mesmo pela variação dos valores da pressão barométrica ao longo da penetração de frentes frias, acompanhadas pela alteração da velocidade e da direção predominantes dos ventos (CUNHA; VECCHIA, 2007), possibilitando a identificação de episódios representativos do fato climático e suas repercussões sobre os valores das temperaturas obtidas das plataformas de teste através da elaboração e análise de gráficos.

Caracterização da área de estudo

O trabalho foi conduzido no Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais – CRHEA da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – EESC-USP. O CRHEA está localizado às margens da Represa do Lobo no município de Itirapina-SP, região central do Estado de São Paulo, entre as coordenadas 22°01’22”/22°10’13” S e 43°57’38”/47°53’57” O, com altitude de 733 m (Figura 1).

Figura 1. Localização espacial do Município de Itirapina e imagem de satélite indicando a localização do CRHEA



Fonte: Os autores

O clima da região é do tipo Cwa, de acordo com a classificação clássica de Köppen-Geiger, que indica clima temperado com registros de temperaturas acima de 22° C no mês mais quente do ano e inverno seco (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007). Sob a ótica dinâmica do clima, a região se caracteriza pela passagem de frentes frias ao longo de todo o ano. Segundo Monteiro (1973) a região de São Carlos possui clima controlado por massas equatoriais e tropicais, caracterizando-se por climas tropicais alternadamente secos e úmidos. No período seco, entre os meses de abril e setembro, a frequência de chuva diminui consideravelmente e se constitui na área de inverno nitidamente mais seco do Estado de São Paulo, quando predominam sobre a região as massas de ar Tropical Continental (mTc), Tropical Atlântica (mTa) e Polar Atlântica (mPa), apresentando baixa precipitação, pouca nebulosidade, baixa umidade relativa e temperaturas médias menores que as dos períodos chuvosos.

Construção das plataformas e instrumentação

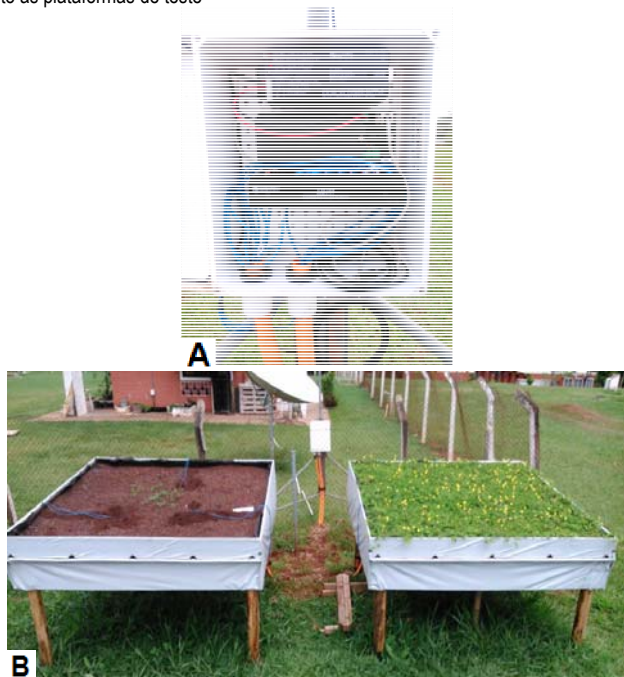
A estrutura das plataformas consiste em uma caixa com dimensões de 2,20 m x 2,20 m de base com laterais de 0,15 m de altura, construída com compensado de madeira e suspensa por duas traves de madeira a uma altura de 1,00 m em relação ao nível do solo. Outras quatro chapas de madeira foram fixadas lateralmente, abaixo da base, formando uma cavidade para funcionar como quebra-vento. Foi adotada uma inclinação de 5% para a estrutura a fim de se obter uma drenagem lenta e otimizar o tempo de retenção da água, de forma a tornar mais uniforme a distribuição da umidade no substrato.

A impermeabilização das plataformas foi executada com a aplicação de uma membrana de polietileno de alta densidade (PEAD) e sobre a membrana de impermeabilização foi instalado um sistema de drenagem da água formado por um geocomposto estruturado, constituído por um geotêxtil não-tecido aderido a uma manta flexível formada por filamentos de polipropileno com a função de não permitir a saturação muito prolongada do substrato, mantendo a umidade adequada para a vegetação. O substrato utilizado foi elaborado através da mistura de um substrato comercial, composto por turfa e carvão vegetal triturado, com o solo proveniente do próprio local do estudo previamente peneirado para retirada de pedras e em seguida homogeneizado manualmente. As plataformas foram preenchidas com substrato de modo a se obter uma espessura de 0,10 m no momento da instalação dos sensores. Para compor a cobertura da plataforma de teste foi selecionada a espécie *Arachis pintoii* (gramameandoim), planta nativa do Brasil que desenvolve-se bem em áreas sujeitas ao alagamento, é tolerante à sombra,

ao frio e pode sobreviver a períodos de seca superiores a quatro meses e a geadas em regiões subtropicais.

Para se obter as medições de temperatura foram instalados nas plataformas de teste 14 termopares tipo T (cobre-constantan) conectados a um multiplexador AM25T e um datalogger CR10X (Campbell Scientific Inc.), que registra e armazena os valores de acordo com uma rotina de programação que fica acondicionado em um gabinete selado ao lado das plataformas de teste (Figuras 2A e 2B).

Figura 2. (A) Datalogger e multiplexador com a conexão dos termopares; (B) datalogger junto às plataformas de teste

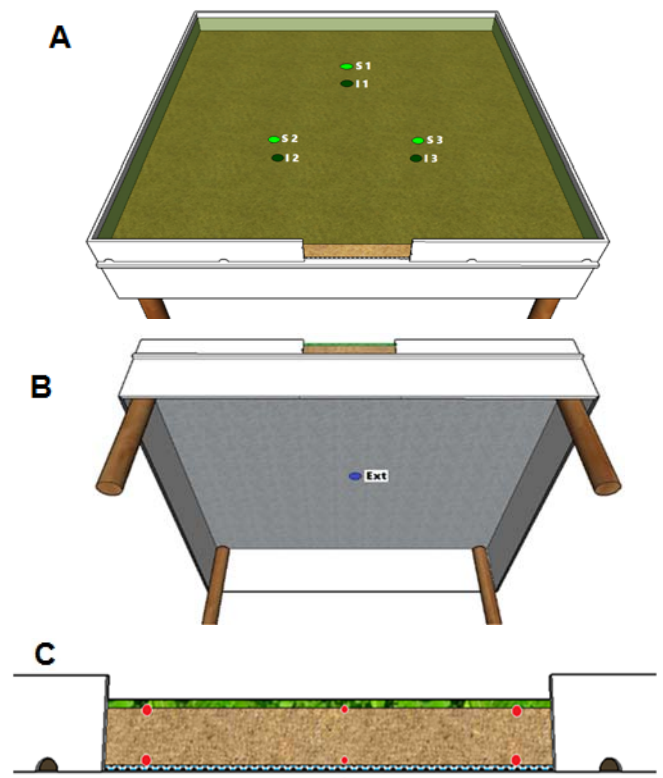


Fonte: Os autores

O datalogger foi programado para se obter registros de temperatura máxima a cada 20 segundos com totalização a cada 30 minutos, somando 180 medições por hora e 4320 medições diárias de cada um dos pontos, que compuseram a série de dados.

Após a montagem e programação dos equipamentos, os sensores foram instalados nas plataformas de teste. Cada plataforma recebeu um conjunto de 7 sensores, sendo 3 no nível superior do substrato, 3 inferiores, no nível mais profundo do substrato e 1 externo, abaixo da base da plataforma. Os sensores superiores da Plataforma Verde foram denominados como Verde Superior (VS), os inferiores denominados como Verde Inferior (VI) e os externos denominados como Verde Externo (V Ext). Na Plataforma Controle, os sensores superiores foram denominados Controle Superior (CS), os inferiores denominados Controle Inferior (CI) e os externos denominados Controle Externo (C Ext). As Figuras 3A, 3B e 3C mostram o posicionamento dos sensores nas plataformas.

Figura 3. (A) Representação com a indicação do posicionamento dos sensores superiores e inferiores no substrato; (B) do sensor externo nas plataformas e (C) corte mostrando o posicionamento dos sensores



Fonte: Os autores

Em ambas as plataformas os sensores superiores foram fixados abaixo de uma camada de 0,5 cm de substrato, para se evitar interferência nas medições pela incidência direta da radiação solar, os sensores inferiores fixados a 0,10 m de profundidade e os sensores externos fixados na superfície da base externa das plataformas em um pequeno orifício e protegido com pasta térmica.

Essa configuração de distribuição dos sensores foi utilizada de maneira a se obter uma maior confiabilidade na aquisição das temperaturas superficiais devido à característica heterogênea do substrato, permitindo assim uma análise mais realista do gradiente de temperatura nos sistemas de cobertura.

Os dados das variáveis climáticas foram coletados pela estação meteorológica automática do CRHEA, composta por um conjunto de sensores específicos conectados a um datalogger CR1000 (Campbell Scientific Inc) programado para obter medições a cada 30 segundos, com totalização a cada 30 minutos.

Análise estatística

Os valores das totalizações obtidas por cada um dos três sensores superiores e inferiores foram submetidos a um teste estatístico (Teste de Grubbs) para se verificar a presença de valores extremos (*outliers*) entre eles quando

do cálculo da média dos valores de temperatura (GRUBBS, 1969).

Em todos os critérios para se testar valores extremos, desenvolve-se o cálculo numérico amostral (estatística) e compara-se com um valor crítico baseado na teoria de amostras aleatórias, para decidir se existe ou não uma observação considerada de valor extremo. No teste de Grubbs, a estatística é obtida pela Equação 1:

Equação 1. Teste estatístico de valores extremos.

$$Z = \frac{|x_i - \bar{x}|}{s}$$

onde:

x_i : é uma observação da amostra x_1, x_2, \dots, x_n ;

\bar{x} : é a média amostral;

s : é o desvio padrão amostral.

Esta estatística testa as seguintes hipóteses:

- H_0 : x_i é uma observação considerada de valor extremo.
- H_1 : x_i não é uma observação considerada de valor extremo.
- Rejeita-se a hipótese H_0 com nível de significância α , $Z > Z_c$. O nível de significância adotado nos testes foi de 0,05.

Análise climática

O regime climático local foi analisado na forma de episódios representativos, de acordo com a adaptação de Vecchia (1997) da definição de Tipos de Tempo de Monteiro (1969), permitindo que seja determinada a fase mais apropriada à realização de experimentos quando da necessidade de uma análise climática voltada ao estudo do comportamento térmico de um sistema de cobertura e, no caso do presente trabalho, da sua reação frente ao calor.

A NBR 15575 (ABNT, 2013) define dia típico experimental para calor aquele no qual foi registrada uma temperatura máxima maior do que as temperaturas máximas da série histórica para o período ou maior do que a máxima absoluta registrada. Foram utilizadas também como referência para o estudo as séries históricas contidas das Normais Climatológicas 1961-1990 computadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2016), que constituem uma base de dados medidos por estações que caracterizam o clima das cidades.

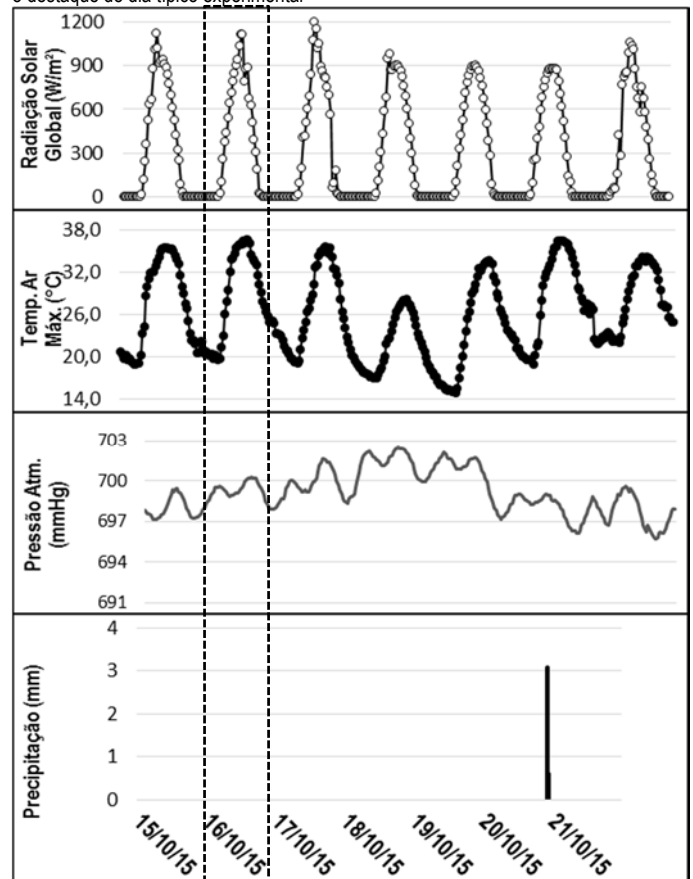
Resultados e discussão

Análise do período de coleta

O episódio climático representativo selecionado para as análises foi registrado entre os dias 15 a 21/10/2015, período em que a região esteve sob o domínio de uma massa de ar Tropical Continental de característica quente e seca, no qual foram registrados os mais elevados valores de temperatura do ar no mês e de onde foi extraído o dia típico experimental.

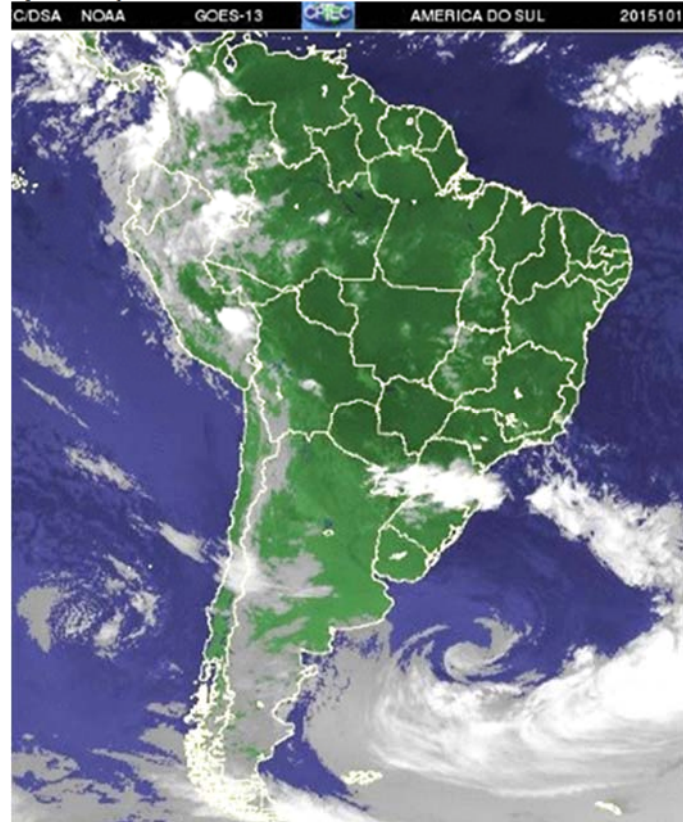
Para a identificação das massas atuantes foram avaliados os dados das principais variáveis climáticas do período por meio de gráficos (Figura 4) e com confirmação da massa atuante no Estado de São Paulo, identificada por meio de imagens do satélite GOES-13 (Geostationary Operational Environmental Satellite), fornecidos pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (INPE, 2016) que permitiram a visualização do movimento das massas sobre a região Sudeste do país, onde as áreas brancas indicam a presença de nuvens (Figura 5).

Figura 4. Análise das principais variáveis climáticas do período de 15 a 21/10/2015 com o destaque do dia típico experimental



Fonte: Os autores

Figura 5. Imagem de satélite mostrando a atuação das massas de ar em 16/10/2015



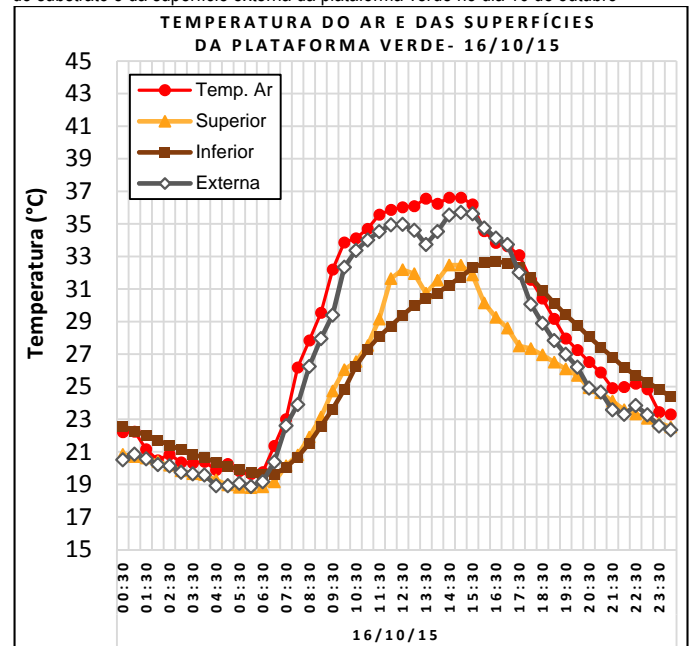
Fonte: INPE-CPTEC (2016)

Após a análise dos episódios atmosféricos ocorridos no período, o dia 16 de outubro foi tomado como dia de referência para o estudo do comportamento térmico, quando a temperatura do ar atingiu o valor de 36,6°C, superando a temperatura máxima absoluta para o mês de outubro registrado em 1963, com valor de 36,4°C, obtida das Normais Climatológicas. Além dos elevados valores de temperatura do ar, o dia típico experimental apresentou radiação solar global máxima de 1113 W/m², às 12h30.

Análise dos dados das plataformas

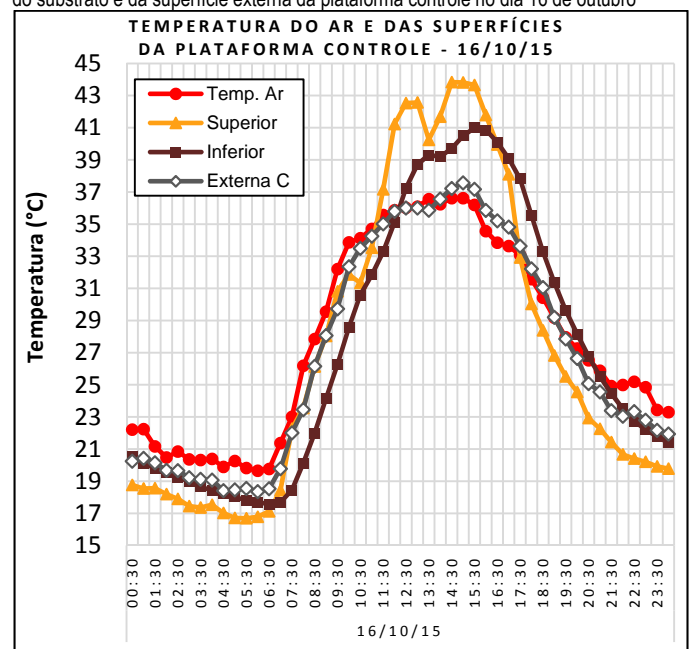
Após a verificação da consistência dos registros submetidos ao teste estatístico, nenhum valor extremo foi identificado e então iniciou-se a análise dos dados das temperaturas superficiais. Para a análise do comportamento térmico dos sistemas de cobertura os valores obtidos foram plotados na forma de gráficos mostrando a variação da temperatura do ar, das temperaturas superficiais superior e inferior do substrato e dos sensores externos das plataformas verde e controle. As Figuras 6 e 7 e a Tabela 1 mostram as temperaturas referentes ao dia experimental.

Figura 6. Gráficos dos valores das temperaturas do ar, das superfícies superior e inferior do substrato e da superfície externa da plataforma verde no dia 16 de outubro



Fonte: Os autores

Figura 7. Gráficos dos valores das temperaturas do ar, das superfícies superior e inferior do substrato e da superfície externa da plataforma controle no dia 16 de outubro



Fonte: Os autores

Tabela 1: Dados de temperatura máxima, mínima e amplitude térmica do ar, das superfícies superiores, inferiores e externa das plataformas verde (θVS, θVI e θV Ext) e controle (θCS, θCI e θC Ext) no dia 16 de outubro.

Indicador	Ar	θVS	θVI	θV Ext	θCS	θCI	θC Ext
Máx (°C)	36,6	32,5	32,7	35,7	43,8	41,0	37,6
(hora)	14:30	14:30	16:30	15:00	14:30	15:30	15:00
Mín (°C)	19,7	18,8	19,6	18,9	16,7	17,6	18,4
(hora)	6:00	6:30	7:00	6:00	5:30	6:30	6:00
ΔT (°C)	16,9	13,7	13,1	16,8	27,1	23,4	19,2

Fonte: Os autores.

Verificou-se, na cobertura verde, que o valor da temperatura máxima da superfície inferior foi registrado 2h00 após o registro da temperatura máxima da superfície superior, superando-a em apenas 0,2°C. Nas superfícies superior e inferior foram registrados valores de temperatura máxima de 4,1°C e 3,9°C abaixo da temperatura máxima do ar, respectivamente. A amplitude térmica da superfície superior foi semelhante àquela apresentada pela superfície inferior, superando-a em apenas 0,6°C.

Na cobertura controle a temperatura máxima da superfície inferior foi registrada 1h00 após o registro da temperatura máxima da superfície superior, com valor 2,8°C menor. Os valores das temperaturas máximas da superfície superior e inferior superaram a temperatura máxima do ar em 7,2°C e 4,4°C, respectivamente, e a amplitude térmica da superfície superior foi 3,7°C maior do que a da superfície inferior. Nota-se que a amplitude térmica das duas superfícies da cobertura verde foi menor do que a amplitude das duas superfícies da cobertura controle.

Os valores da temperatura máxima superficial superior de ambas as coberturas e da temperatura máxima do ar foram registrados no mesmo horário e apresentaram maiores amplitudes térmicas em relação aos inferiores. Porém, os valores registrados, tanto na superfície superior, quanto na inferior da cobertura verde, foram menores que os registrados nas superfícies superior e inferior da cobertura controle.

Os sensores das superfícies externas de ambas as plataformas registraram temperaturas máximas no mesmo horário e com um atraso térmico de 1h00 em relação à temperatura máxima do ar, quando o sensor da plataforma verde registrou uma temperatura de 0,9°C abaixo da temperatura do ar e o sensor da plataforma controle registrou 1,0°C acima da temperatura do ar.

Comparadas as temperaturas máximas, o sensor da plataforma controle registrou valor de 1,9°C acima do sensor da plataforma verde, que por sua vez apresentou uma amplitude térmica 2,4°C menor do que o sensor da plataforma controle.

Os valores de temperatura registrados pelos sensores das superfícies superiores de ambas as plataformas apresentaram maior amplitude térmica quando comparados com os valores registrados pelos sensores inferiores de suas respectivas plataformas. Isto ocorreu devido à influência da radiação solar incidente nas superfícies superiores. Essa influência ficou evidenciada quando os valores de temperatura da superfície superior das duas plataformas diminuíram após uma queda nos valores de radiação entre 13h00 e 13h30.

As superfícies superiores apresentaram reduções de 1,8°C na cobertura verde e 2,3°C na cobertura controle, voltando

a registrar elevação da temperatura nessas superfícies conforme os valores de radiação voltaram a aumentar. A temperatura da superfície inferior da cobertura verde não respondeu a essa variação observada na superfície superior, durante o mesmo período. Porém, pode-se verificar na cobertura controle que a temperatura da superfície inferior permaneceu estável durante o período e voltou a aumentar seguindo a mesma tendência da superfície superior. A temperatura da superfície externa da plataforma verde apresentou uma redução de 1,3°C, enquanto a temperatura da superfície externa da plataforma controle permaneceu estável durante o mesmo período de redução da radiação.

Analisando os gráficos, pode-se notar que a radiação solar foi o principal fator que determinou a transferência de calor, a partir da superfície superior, pela termoconversão, resultando no aumento da temperatura durante o período diurno, assim como na diminuição das suas temperaturas pela perda da energia térmica acumulada para a atmosfera - quando cessa a incidência pela presença de nebulosidade e também durante o período noturno. Essa amplitude térmica foi menor nas duas superfícies da plataforma verde do que na plataforma controle, assim como foi menor também a diferença entre as temperaturas máximas das duas superfícies na cobertura verde.

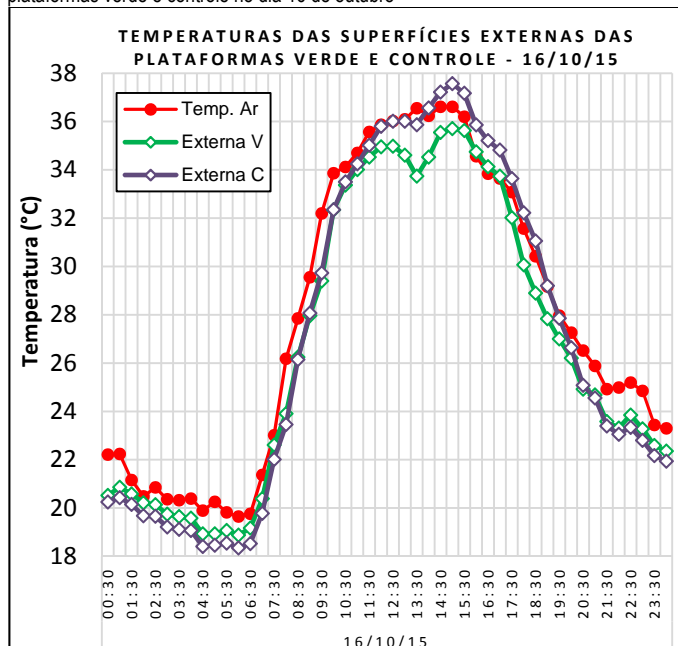
Na cobertura da plataforma verde observou-se que no horário em que a temperatura da superfície inferior atingiu o seu valor máximo, às 16h30, a temperatura da superfície superior já se encontrava abaixo deste valor, tendo atingido seu valor máximo anteriormente. No dia experimental, quando a temperatura da superfície inferior atingiu o seu valor máximo, seu valor superou a temperatura da superfície superior em 3,4°C e foi superado pela superfície externa em 1,1°C.

Em relação à cobertura da plataforma controle pode-se observar que, no horário em que a superfície inferior atingiu sua temperatura máxima, o valor registrado não superou o valor da superfície superior, mas ficou acima da temperatura da superfície externa. No horário em que a temperatura da superfície inferior atingiu o seu valor máximo, a temperatura da superfície superior estava 2,7°C acima deste valor e a temperatura da superfície externa estava 3,8°C abaixo deste valor.

Analisando a variação da temperatura da superfície externa das duas plataformas, os valores registrados na plataforma verde somente superaram a temperatura do ar em 0,3°C às 16h30, permanecendo abaixo no restante do período analisado. Na plataforma controle, a temperatura externa superou a temperatura do ar entre 14h30 e 18h30, com diferença máxima às 16h30, de 1,4°C acima. A Figura 8 mostra a variação das temperaturas da superfície externa de ambas as plataformas no dia experimental.

Embora as diferenças de temperatura entre as superfícies externas das plataformas em relação à temperatura do ar sejam pouco significativas, pode-se perceber que elas acompanharam as tendências das respectivas coberturas, nas quais, na plataforma verde, a temperatura máxima da superfície externa não superou a temperatura máxima do ar e, na plataforma controle, a temperatura máxima da superfície externa superou a temperatura máxima do ar.

Figura 8. Gráficos dos valores das temperaturas do ar e da superfície externa das plataformas verde e controle no dia 16 de outubro



Fonte: Os autores

Ressalta-se que o melhor desempenho térmico da cobertura verde, que apresentou menores valores de temperatura no perfil do substrato quando comparado à cobertura sem vegetação, se deve tanto ao sombreamento proporcionado pela camada foliar quanto pelo maior albedo dessa camada pelo efeito da evapotranspiração. O sombreamento bloqueia parte da radiação incidente e favorece a retenção da umidade no substrato, que perde energia térmica através da evapotranspiração. Na ausência de uma cobertura vegetal, o substrato exposto retém

menos umidade que seria evaporada durante o dia e também absorve mais radiação, por ser mais escuro do que a camada foliar. Para melhor desempenho térmico de uma cobertura verde, torna-se importante a escolha do tipo de vegetação a ser utilizada, que deve priorizar espécies com maior área de cobertura foliar horizontal e com maior taxa de transpiração.

Conclusão

O projeto de coberturas verdes em edificações requer parâmetros que auxiliem no dimensionamento dos sistemas e permitam quantificar o seu desempenho térmico. Um sistema de cobertura verde funciona como um elemento de elevada inércia térmica, permitindo, conseqüentemente, amortecimentos e atrasos térmicos significativos.

Desta forma é possível definir que para um dia quente e seco a presença de uma camada densa de vegetação influencia os processos de troca de calor no perfil do substrato, devido ao bloqueio de parte da radiação solar incidente, permitindo que a superfície superior do substrato não atinja temperaturas acima da temperatura máxima do ar. A presença da vegetação também resulta em um componente construtivo de maior atraso térmico. A seleção da vegetação adequada, assim como a sua correta manutenção, é fundamental para o sucesso do sistema. Uma vez exposto, o solo passa a agir como um acumulador de energia térmica transferindo rapidamente essa energia à edificação.

Este presente trabalho contribui com os estudos de sistemas de cobertura verde para o uso na construção civil ao fornecer parâmetros em relação à amplitude e atraso térmicos de um conjunto formado por uma camada de substrato composto por materiais de uso comercial e com espessura suficiente para suportar uma vegetação de cobertura foliar densa, nativa do Brasil, e que confere um bom desempenho térmico em períodos de calor.

Agradecimentos

À CAPES, pelo apoio a esta pesquisa através da concessão de bolsa de estudo.

Referências

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**: edifícios habitacionais: desempenho: parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.

BAPTISTA, Cassiano Ricardo Weinhardt; MORETINI, Cristiano Alves; MARTINEZ, José Lino. *Arachis pintoi*, palatabilidade, crescimento e valor nutricional frente ao pastoreio de equinos adultos. **Revista Acadêmica**. Curitiba, v. 5, n. 4, p. 353-357, out/dez. 2007. eISSN 1981-4178. Disponível em: <<http://www2.pucpr.br/reol/pb/index.php/academica?dd1=1871&dd99=view&dd98=pb>> Acesso em: 14/4/2017.

BEATRICE, Caio Cury. **Avaliação do potencial de uso de três espécies vegetais como cobertura leve de telhados em edificações**. 2011. 125 p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. doi: <http://doi.org/10.11606/D.18.2011.tde-22092011-151752>.

BERRETTA, Christian; POË, Simon; STOVIN, Virginia. Moisture content behaviour in extensive green roofs during dry periods: the influence of vegetation and substrate characteristics. **Journal of Hydrology** 511, 374–386, apr. 2014. ISSN 0022-1694. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.036>

BLANUSA, Tijana; MONTEIRO, M. Madalena Vaz; FANTOZZI, Federica; VYSINI, Eleni; LI, Yu; CAMERON, Ross W. F. Alternatives to Sedum on green roofs: Can broad leaf perennial plants offer better ‘cooling service’? **Building and Environment**. 59, p.99-106, jan. 2013. ISSN: 0360-1323. doi: <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.08.011>

COSTA, Jeferson da; COSTA, Anderson; POLETO, Cristiano. Telhado verde: redução e retardo do escoamento superficial. **Revista de Estudos Ambientais (Online)**, Blumenau, v. 14, n. 2esp, p. 50-56, 2012. ISSN 1983 1501. doi: <http://dx.doi.org/10.7867/1983-1501.2012v14n2p49-55>

COUTTS, Andrew M.; DALY, Edoardo; BERINGER, Jason.; TAPPER, Nigel. J. Assessing practical measures to reduce urban heat: Green and cool roofs. **Building and Environment**, 70, p. 266-276, dec. 2013. ISSN 0360-1323. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.021>

CUNHA, Davi Gasparini Fernandes; VECCHIA, Francisco. As abordagens clássica e dinâmica de clima: uma revisão bibliográfica aplicada ao tema da compreensão da realidade climática. **Ciência e Natura**, UFSM, 29 (1): 137-149, 2007. eISSN 2179-460X. doi: [10.5902/2179460X](http://dx.doi.org/10.5902/2179460X)

DUNNETT, Nigel; KINGSBURY, Noel. **Planting Green Roofs and Living Walls**. Portland: Timber Press, 2008, 327p.

DURHMAN, Angela. K.; ROWE, D. Bradley; RUGH, Clayton L. Effect of Substrate Depth on Initial Growth, Coverage, and Survival of 25 Succulent Green Roof Plant Taxa. **HortScience** v. 42, n. 3, p.588-595, jun. 2007. eISSN 2327-9834.

EMILSSON, Tobias. **Extensive vegetated roofs in Sweden: establishment, development and environmental quality**. 2005a. 34f. Tese (Doutorado em Horticultura) – Faculty of Landscape Planning, Horticulture and Agricultural Science. Department of Landscape Management and Horticultural Technology Alnar. Swedish University of Agricultural Sciences. Sweden, 2005.

FREITAS, R. O que é conforto. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8; ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4, 2005, Maceió. **Anais...** Maceió: COTEDI, 2005, p. 726-735.

GIVONI, Baruch. **Man, climate and architecture**. 2.ed. London: Applied Science, 1976.

GRUBBS, Frank. E. **Procedures for detecting outlying observations in samples**. Taylor & Francis Group, vol 11, 1969, p 1-21.

IGRA – International Green Roof Association Disponível em: <<http://www.igra-world.com/index.php>> . Acesso em: 20/5/2016.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais Climatológicas do Brasil 196-1990**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>> Acesso em 12/08/2015.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Acervo de imagens**. Disponível em: <<http://satelite.cptec.inpe.br/home/index.jsp>> Acesso em: 12/01/2016.

JIM, Chi Yung; TSANG, S. W. Biophysical properties and thermal performance of an intensive green roof. **Building and Environment**. 46, 1263-1274, jun. 2011. ISSN 0360-1323. doi: <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.013>

JOHNSTON, Jacklyn.; NEWTON, John. **Building green: a guide for using plants on roofs, walls and pavements**. Greater London Authority, London, 2004.

LOPES, Daniela Arantes Rodrigues. **Análise do comportamento térmico de uma cobertura verde leve (CVL) e diferentes sistemas de cobertura**. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

- MILLER, Ana Priscilla Romero Rodrigues. **Análise do comportamento de substrato para retenção de água pluvial para coberturas verdes extensivas em Curitiba-PR**. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- MONTEIRO, Carlos Augusto de Figueiredo. **A frente polar atlântica e as chuvas de inverno na fachada Sul Oriental do Brasil: estudo geográfico sob forma de atlas**. São Paulo: Instituto de Geografia- USP, 1969.
- MONTEIRO, Carlos Augusto de Figueiredo. **A dinâmica climática e as chuvas no Estado de São Paulo: estudo geográfico sob forma de atlas**. São Paulo: Instituto de Geografia- USP, 1973.
- MORAIS, Caroline Santana de. **Desempenho térmico de coberturas vegetais em edificações na cidade de São Carlos-SP**. 2004. 108 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Exatas e da Terra) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/4628>
- MORUZZI, Rodrigo Braga; MOURA, Cinthia Cristine de; BARBASSA, Ademir Pacelli. Avaliação do efeito da inclinação e umidade antecedente na qualidade e quantidade das parcelas escoadas, percoladas e armazenadas em telhado verde extensivo. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 3, p. 59-73, jul./set. 2014. ISSN 1678-8621. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212014000300005>
- NIACHOU, Aikaterini; PAPAKONSTANTINO, Konstantinos; SANTAMOURIS, Mat; TSANGRASSOULIS, Aris; MIHALAKAKOU, Giouli K. Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. **Energy and Buildings** 33, p. 719-729. sep. 2001. ISSN 0378-7788 doi: [http://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00062-7](http://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00062-7)
- OBERNDORFER, Erica; LUNDHOLM, Jeremy; BASS, Brad; COFFMAN, Reid R.; DOSHI, Hitesh; DUNNETT, Nigel; GAFFIN, Stuart; KÖHLER, Manfred; LIU, Karen K. Y.; ROWE, Bradley. Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services. **BioScience**, 57 (10) p. 823-833. nov. 2007. ISSN 1525-3244. doi: <http://dx.doi.org/10.1641/B571005>
- OLIVEIRA, Clooer Costa. **Substratos para uso em telhados verdes: Avaliação da retenção hídrica e qualidade da água de escoamento**. 2012, f. 115. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <http://www.peamb.eng.uerj.br/producao.php?id=565>
- PECK, Steven W.; CALLAGHAN, Chis; KUHN, Monica E.; BASS, Brad. **Greenbacks from green roofs: forging a new industry in Canada status report on benefits, barriers and opportunities for green roof and vertical garden technology diffusion**. Canada: Mortgage and Housing, 1999.
- PEEL, Murray C.; FINLAYSON, Brian L.; MCMAHON, Thomas A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, n 11, p.1633-1644, oct. 2007. eISSN 1607-7938 doi: <http://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- PLEDGE, Earth. **Green Roofs: Ecological Design and Construction**. Philadelphia: Shiffler. 154 p. 2005.
- PREVEDELLO, Celso Luiz. **Física do solo com problemas resolvidos**. Salesward-Discovery, Curitiba, 446 p. 1996.
- SANTOS, Daniel José Pereira. **Desempenho térmico de uma cobertura verde num edifício solar passivo**. 2012, f. 79. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2012. Disponível em: <https://ria.ua.pt/handle/10773/10218>
- SEIXAS, Grace Tibério Cardoso. **Climatologia aplicada à Arquitetura: investigação experimental sobre a distribuição de temperaturas internas em duas células de teste**. 2015. 126p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.
- SEIXAS, Grace Tibério Cardoso de. **Climatologia aplicada à arquitetura: investigação experimental sobre a distribuição de temperaturas internas em duas células de teste**. 2015, 126 p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2015. doi: <http://doi.org/10.11606/T.18.2015.tde-04052015-101205>.
- SUSCA, Tiziana, GAFFIN, Stuart R.; DELL'OSSO, G. R. Positive effects of vegetation: urban heat island and green roofs. **Environment Pollution**. 159(8-9): 2119-26. aug/sep. 2011. ISSN 0269-7491 doi: <http://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.03.007>

VECCHIA, Francisco Arthur da Silva. **Clima e ambiente construído**: a abordagem dinâmica aplicada ao conforto humano. Tese (Doutorado) – Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

VECCHIA, Francisco. **Comportamento térmico de sistemas de cobertura**. Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Hidráulica e Saneamento. Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada. 01. ed. São Paulo: Eternit. v. 01. 74 p, 2003.

VECCHIA, Francisco. Cobertura Verde Leve (CVL): Ensaio Experimental. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ENCAC), 6.. ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ELACAC), 4., 2005, Maceió. **Anais...** Maceió: COTEDI. 2005, p. 2146-2155.

YOK, Tan Puay.; SIA, Angelia. **A Selection of Plants for Green Roofs in Singapore**. Publication of National Parks Board, Singapore, 2008.

¹ **Rafael Perussi**

Biologia. Mestre. Rua Vitor Manuel de Souza Lima, 453 ap 41, São Carlos, SP, Brasil CEP 13561-020

² **Francisco Arthur da Silva Vecchia**

Engenharia de Produção. Livre docente. Rua Rheda Widenbruck, 565 São Carlos, SP, Brasil CEP 13565-550