PROCESSO DE CALIBRAÇÃO DE MODELO CLIMÁTICO DO ENVI-MET PARA SIMULAÇÕES TERMODINÂMICAS DE ESPAÇOS URBANOS ABERTOS DE SÃO PAULO EM DIAS QUENTES

Gabriel Bonansea de Alencar Novaes (1); Leonardo Marques Monteiro (2)
(1) Mestre em Arquitetura e Urbanismo, gabrielalencarnovaes@hotmail.com, Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética (LABAUT), Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAU USP), R. do Lago, 876 - Butantã, São Paulo - SP, 04280-000
(2) Professor Livre-Docente em Arquitetura e Urbanismo, leo4mm@usp.br, Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética (LABAUT), Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAU USP), R. do Lago, 876 - Butantã, São Paulo - SP, 04280-000

RESUMO
Como uma das etapas de uma dissertação de mestrado (NOVAES, 2020), este trabalho apresenta o processo de calibração de um modelo climático do *ENVI-met* para a avaliação de espaços urbanos abertos de São Paulo durante dias quentes, feita por meio de sucessivas simulações a partir de dados microclimáticos de medições empíricas realizadas no local representado nas simulações, das estações meteorológicas do IAG USP e do arquivo climático do Aeroporto de Congonhas, comparando os resultados das principais variáveis microclimáticas (temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, direção do vento, e radiação) entre simulação e medições ao longo de um período de 24 horas. Através do *input* dos dados citados, foi possível configurar um modelo climático calibrado para a simulação de condições térmicas microclimáticas na cidade de São Paulo para um dia quente e seco, marcado por altas temperaturas do ar, baixa nebulosidade, alta incidência solar e baixas taxas de umidade relativa. O modelo climático calibrado criado apresentou boa aderência de resultados às medições empíricas realizadas, dentro dos limites de tolerância esperados, e pode ser utilizado para estudos envolvendo a simulação do desempenho térmico de espaços urbanos da cidade de São Paulo submetidos a estas condições. No processo de calibração, foi possível evidenciar as vantagens do uso do *ENVI-met* para simulações térmicas de espaços urbanos abertos, sua adequação e adaptabilidade para a simulação de modelos representativos do Brasil, em especial de São Paulo, e também as principais dificuldades do processo de simulação com o *ENVI-met*, principalmente em função das limitações de suas ferramentas e das grandes necessidades de capacidade e tempo de computação para os cálculos das simulações.
Palavras-chave: simulação térmica, condições térmicas em espaços urbanos abertos, microclima urbano

ABSTRACT
As one of the stages of a MSc project (NOVAES, 2020), this work presents the calibration process of an ENVI-met climate model for the evaluation of open urban spaces in São Paulo during hot days, carried out through successive simulations configured with microclimatic data from empirical measurements carried out at the location represented in the simulations, from IAG USP meteorological stations and from the climate file at Congonhas Airport, comparing the results of the main microclimate variables (air temperature, relative humidity, wind speed, wind direction, and radiation) between simulation and measurements over a 24-hour period. Through the input of the aforementioned data, it was possible to configure a calibrated climatic model for the simulation of microclimate thermal conditions in the city of São Paulo for a hot and dry day, marked by high air temperatures, low cloudiness, high solar incidence and low rates of relative humidity. The calibrated climate model created showed good adherence of results to the empirical measurements performed, within the expected tolerance limits, and can be used for studies involving the simulation of the thermal performance of open urban spaces in the city of São Paulo submitted to these conditions. In the calibration process, it was possible to highlight the advantages of using ENVI-met for thermal simulations of open urban spaces, its adequacy and adaptability for the simulation of models in Brazil, especially in São Paulo, and also the main difficulties of the simulation process with ENVI-met, mainly due to the limitations of its tools and the great needs of computing capacity and time for the calculations of the simulations.
Keyword: thermal simulation, thermal conditions in open urban spaces, urban microclimate

1. INTRODUÇÃO

O uso de *softwares* para simular as condições térmicas de edifícios e áreas urbanas vem ganhando cada vez mais espaço (BARBOSA, 2018). Neste contexto, o *ENVI-met* surgiu como uma aplicação de modelos de cálculo de balanço térmico em sua primeira referência pública em 1998 (BRUSE; FLEER, 1998), como um *software* que realiza simulações numéricas preditivas das condições microclimáticas de espaços urbanos abertos através de princípios da mecânica dos fluídos e da termodinâmica e dos parâmetros físicos das massas construídas, das superfícies, dos solos, das vegetações, das edificações que representam a geometria e a morfologia da cidade, etc. Especialmente no meio acadêmico, a ferramenta já foi utilizada em pesquisas com foco em análises de condições ambientais e microclimatológicas em espaços urbanos abertos, com exemplos internacionais e nacionais, alguns apresentados neste artigo e outros explorados em NOVAES (2020).

O *ENVI-met* permite a simulação de cenários diversos de características físicas dos ambientes e de características climáticas, permitindo estudar comparativamente os impactos de diversas soluções e/ou condições de ambiente urbano para a climatologia local. Usa um modelo tridimensional para simular as interações entre edifícios, solo, vegetação e atmosfera para ambientes urbanos, permitindo, assim, analisar a interação entre cidade e microclima. O modelo inclui, dentre outros aspectos, o estudo dos fluxos e das turbulências da circulação de ar nas vias e entre os edifícios e das trocas de calor e vapor entre os elementos do meio urbano, verificando o desempenho térmico das áreas estudadas e as alterações microclimáticas ocasionadas pelas trocas de calor no ar, nos edifícios, na vegetação e no solo, através de parâmetros ambientais, incluindo a radiação de onda curta e longa, o fluxo de sombreamento, a reflexão e a irradiação de radiação (SHINZATO, 2014; BRANCO, 2009; BARBOSA, 2018).

O *software* utiliza dados de entrada inseridos pelo usuário sobre edifícios, vegetação, solos, superfícies, localização e condições climáticas. Deve-se realizar a configuração do arquivo climático e de informações do local que balizará os cálculos, onde é necessário fornecer ao *software* a localização do modelo, as informações climáticas e meteorológicas, etc., e, com isso, cada modelo é associado a informações primordiais de localização e situação geográfica do local de estudo, incluindo coordenadas e altitude. A simulação é, então, processada utilizando os dados de entrada do modelo geométrico e do arquivo de configuração do modelo climático. (ROSHEIDAT, HOFFMAN; BRYAN, 2008)

Com estas informações, o usuário é capaz de introduzir ao *software* os dados que traduzem o clima local, contendo condições locais de temperatura do ar, umidade do ar, nebulosidade, ventos e radiação. Os dados inseridos podem ser advindos de arquivos climáticos consolidados e conhecidos, como os de aeroportos, estações meteorológicas e laboratórios, ou, adicionalmente ou alternativamente, o *ENVI-met* permite introduzir dados obtidos por meio de medições empíricas em um determinado local como forma de calibrar o seu arquivo climático para a simulação submetida ao clima de um determinado local. Assim, como uma das etapas de uma dissertação de mestrado (NOVAES, 2020), este trabalho apresenta o processo de calibração de um modelo climático do *ENVI-met* para a avaliação de espaços urbanos abertos de São Paulo durante dias quentes, calibrado a partir de medições empíricas de variáveis microclimáticas em um ambiente existente da cidade.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi a calibração de um modelo climático do *ENVI-met* para a avaliação de espaços urbanos abertos de São Paulo durante dias quentes.

3. MÉ*TO*DO

A calibração do *ENVI-met* foi feita por meio de sucessivas simulações termodinâmicas para compor o modelo climático constituído a partir de dados microclimáticos obtidos por meio de medições empíricas realizadas ao longo de um período de 40 dias no mesmo local representado nas simulações. Foram executados 22 diferentes modelos de simulação de um período de 36 horas (escolhidas dentre o período das medições) até a composição do modelo calibrado, analisados através da comparação das principais variáveis microclimáticas (temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, direção do vento, e radiação) entre as medições e os resultados obtidos no ponto central do modelo simulado, correspondente ao ponto onde foram realizadas as medições. Para este estudo foi utilizada o *software ENVI-met* versão 4.4.3 *Summer* 19 com licença *Science and Education*.

3.1. MEDIÇÕES *IN LOCO* DE DADOS MICROCLIMÁTICOS

As medições empíricas de dados microclimáticos foram realizadas em um sobrado no bairro Mirandópolis, na Zona Sul de São Paulo, entre os dias 06/12/2018 e 14/01/2019. Ainda que, em São Paulo, o verão seja caracterizado por frequentes precipitações, o período de medições de 40 dias, acompanhado de um registro

diário das condições meteorológicas, permitiu escolher um período de avaliação com alta temperaturas, baixa umidade, condições ensolaradas e tempo estável após 4 dias consecutivos.

Os fatores que levaram à escolha do local de medições foram: a possibilidade de permanência do equipamento por longo período em local aberto e descoberto com visão desobstruída de céu, a minimização de interferências de sombreamento por objetos do entorno sobre o equipamento de elementos próximos que pudessem impactar nas medições, o acesso controlado, a segurança contra intrusões e a proteção contra riscos naturais. Como fica evidente na Figura 1, o local do ponto de medições é ocupado principalmente por casas e sobrados geminados com quintal nos fundos. Os edifícios mais próximos se localizavam predominantemente no arco Sul-Sudoeste do ponto de medições, com 8 a 10 pavimentos, e a uma distância razoavelmente grande, superior a 60 m no caso do edifício mais próximo e superior a 150 m nos demais. Sendo assim, não há sombreamento no ponto de medição por nenhum dos edifícios do entorno. Além disso, todas as árvores próximas ao ponto de medição têm altura inferior ou semelhante à do ponto de colocação dos equipamentos, e a única árvore alta próxima está localizada em posição de baixo impacto com relação aos pontos de medição.



Figura 1– Vista aérea do entorno do ponto de medições (NOVAES, 2020)

Para a coleta de dados de Velocidade do Ar (*Var*), Direção do vento, Radiação Solar Global (*Ig*), Temperatura de Globo (*Tg*), Temperatura do Ar (*Tar*), Umidade Relativa (*UR*), em intervalos de 10 minutos, as medições comportaram 2 *Hobos* e 1 Estação Científica *Campbell*, equipados com 3 termohigrômetros, 3 termômetros de globo, 1 anemômetro ultrassônico, e 1 piranômetro em dois subpontos de medição externos totalmente descobertos. As Figuras 2A, 2B, 2C e 2D mostram o subponto inferior, na cobertura de uma edícula de 1 pavimento, enclausurado por paredes laterais, protegido do vento e com visão de céu parcialmente obstruída, contendo 2 termohigrômetros e 2 termômetros de globo a aproximadamente 4,5m do solo, pelos quais foram coletados dados de controle.

As Figuras 3A, 3B, 3C e 3D mostram o subponto principal na laje de cobertura do sobrado de 2 pavimentos, acima da altura das demais casas do entorno, em local totalmente desobstruído vertical e lateralmente, praticamente sem nenhum mascaramento de céu, exposto à insolação e ao vento. No subponto da cobertura, foram colocados 1 termohigrômetro, 1 termômetro de globo, 1 piranômetro (em local desobstruído adiante ao norte verdadeiro em relação aos demais equipamentos) e 1 anemômetro digital ultrassônico (em local desobstruído acima de todos os demais equipamentos), a aproximadamente 7,5m do solo, onde foram coletados os dados utilizados para calibração do modelo de simulação. Os equipamentos foram posicionados a 1,5m do piso e sem nenhum muro, parede ou obstrução vertical próxima, evitando interferências de superfícies sobre as medições.

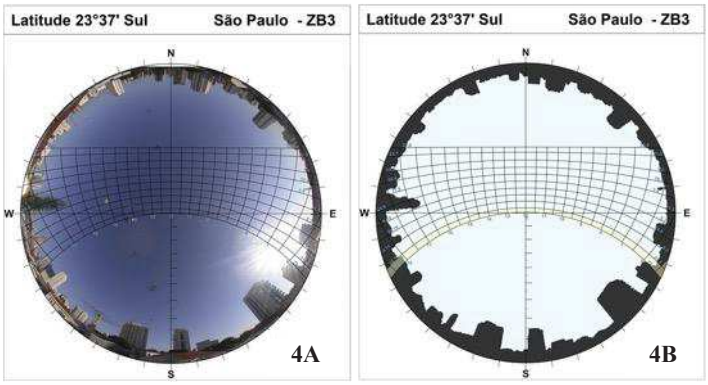


Figuras 2A, 2B, 2C e 2D (da esquerda para a direita) – Subponto inferior (A) com o corpo da Estação Científica *Campbell* (B e C), incluindo painel solar fotovoltaico (B), e um *Hobo* (D) (NOVAES, 2020)



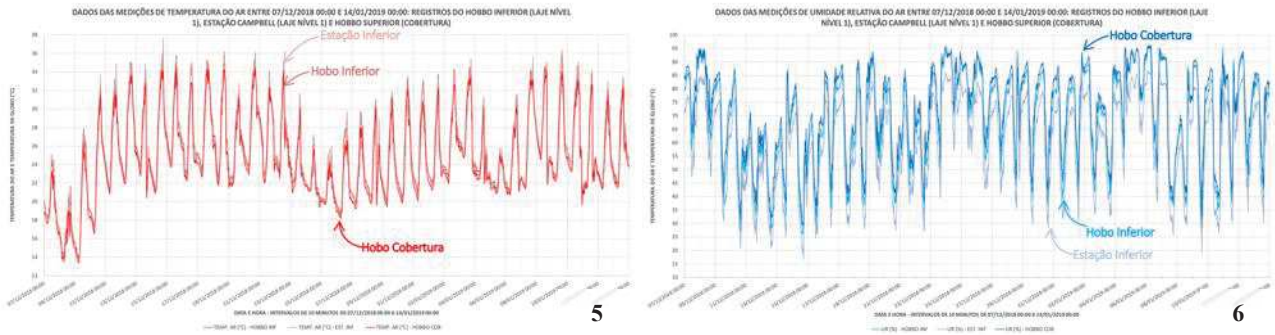
Figuras 3A, 3B, 3C e 3D (da esquerda para a direita) – Subponto da laje de cobertura com equipamentos da Estação Científica *Campbell* (B), incluindo anemômetro (C) e piranômetro (A), e um *Hobo* (D) (NOVAES, 2020)

As Figuras 4A e 4B mostram que, no ponto da laje superior, praticamente não há mascaramento de céu. O ponto permanece na maior parte do ano com visibilidade completa do céu e insolação direta. Somente uma árvore a oeste do ponto traz sombreamento a partir das 16h45 nos meses de março, abril, setembro e outubro e uma edificação no segmento leste-sudeste traz sombreamento até às 6h15 nos meses de fevereiro, março, outubro e novembro. No período de medições, entre dezembro e janeiro, há sombreamento do ponto antes das 5h45 da manhã (22/11 e 21/01) e das 6h00 da manhã (22/12) e após às 18h00. Em todo o período, minimamente nos horários entre 6h00 e 18h00, o ponto permaneceu exposto ao céu e à insolação direta.

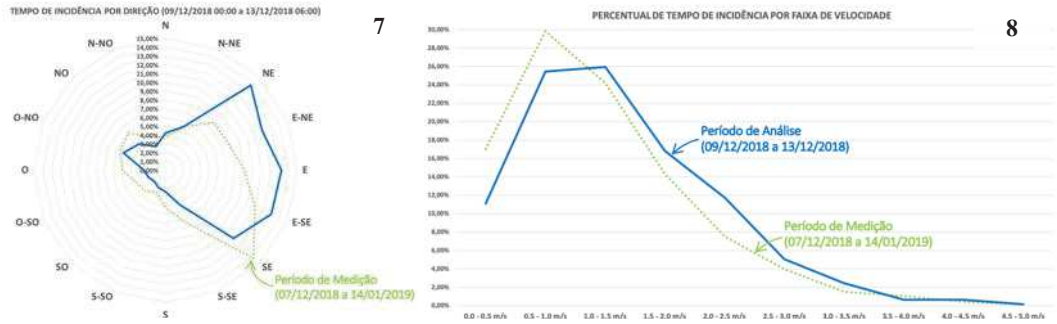


Figuras 4A e 4B (da esquerda para a direita) – Foto tipo "Olho de Peixe" (A) e Estudo de mascaramento de céu e insolação (B) do ponto da laje de cobertura (NOVAES, 2020)

Ao longo do período, foram feitos registros diários das condições climáticas e registros das previsões meteorológicas públicas. Durante o período, as condições se mostraram predominantemente quentes, com dias com altas temperaturas máximas e noites com altas temperaturas mínimas, com diversos dias com condições de céu limpo, baixa nebulosidade e insolação intensa. Houve conjuntos de até 4 dias consecutivos sem precipitação, com altas temperaturas, insolação intensa e baixa *UR*. Na laje de cobertura, a *Tar* variou entre 13,4°C e 37,6°C, com a maioria dos dias ultrapassando 30°C. A UR variou entre 17,0% e 96,3%, com valores acima de 70% na maior parte das noites e abaixo dos 30% em diversos dias. A *Var* variou entre 0,0m/s e 6,5m/s, sendo que, em cerca de 80% do tempo, foi de até 2,0m/s. Em concordância com o IAG/USP (2018), os ventos predominantes advêm da direção SE, representando 24% do tempo de medição. As Figuras 5 a 8 mostram respectivamente as medições de *Tar*, *UR* e tempos de incidência dos ventos por direção e velocidade.



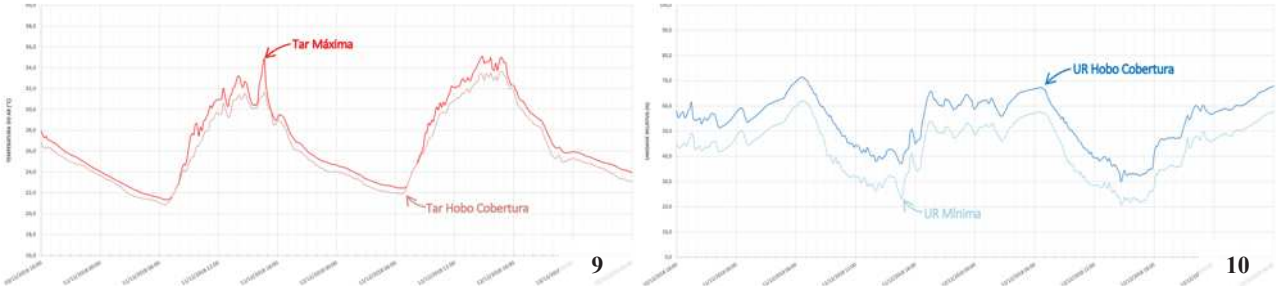
Figuras 5 e 6 (da esquerda para a direita) – Medições de Temperatura do Ar (*Tar*) (5) e Umidade Relativa (*UR*) (6) entre 07/12/2018 e 14/01/2019 (NOVAES, 2020)



Figuras 7 e 8 (da esquerda para a direita) – Tempos de incidência de vento por direção (7) e por velocidade (8) nas medições entre 07/12/2018 e 14/01/2019 (NOVAES, 2020)

3.2. ESCOLHA DO PERÍODO PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO CLIMÁTICO

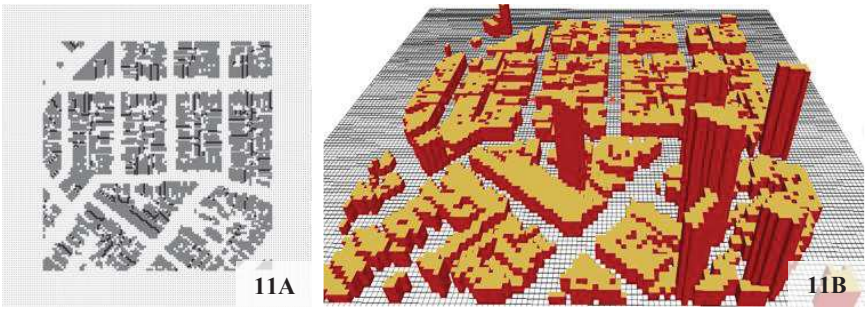
Foi escolhido o dia 12/12/2018 como objeto de avaliação, pois apresentou condição meteorológica estável, predominantemente ensolarada e com pouca incidência de nuvens, sendo o quarto dia consecutivo sem precipitação, com *Tar* de 22°C a 35°C e *UR* de 20% a 68%, caracterizando um dia seco com altas temperaturas. O vento predominante foi advindo da direção Sudeste (138,7°) e a velocidade média ponderada dos ventos foi de 1,5m/s. O período de análise de resultados é um ciclo de 24 horas entre às 6h do dia 12/12 e às 6h do dia 13/12 e, para a adequada estabilização dos modelos e para não haver influências da inicialização do modelo, adotou-se período de simulação de 36 horas com início às 18h00 do dia 11/12, isto é, com 12 horas de antecedência da inicialização da simulação com relação ao início do período estudado. As Figuras 9 e 10 mostram os dados de *Tar* e *UR* no período escolhido de análise.



Figuras 9 e 10 (da esquerda para a direita) – Medições de Temperatura do Ar (*Tar*) (9) e Umidade Relativa (*UR*) (10) no período de análise (NOVAES, 2020)

3.3. ELABORAÇÃO DO MODELO GEOMÉTRICO DE CALIBRAÇÃO

O modelo geométrico é o modelo tridimensional que representa com fidelidade a volumetria, a geometria e disposição das edificações e das vias do local real onde foram realizadas as medições empíricas. Através do Mapa Digital da Cidade de São Paulo (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO, 2019), usando o *software QGis*, foram extraídos os dados georreferenciados dos traçados de ruas e suas respectivas áreas de leito carroçável asfaltado e calçadas, bem como o traçado e geometria das edificações, incluindo áreas de projeção e alturas. Com estes dados, um recorte do bairro em torno do ponto de medições foi realizado com uma área de 300x300m de edifícios e 400x400m de vias e quadras, compondo o modelo geométrico tridimensional, usando os *softwares ENVI-met Monde* e *ENVI-met Spaces*, conforme Figura 11.



Figuras 11A e 11B (da esquerda para a direita) – Modelo tridimensional da região analisada no *ENVI-met* (NOVAES, 2020)

O passo seguinte foi a definição da resolução do modelo. A definição da resolução horizontal e da resolução vertical do modelo, além de seu impacto nos resultados da simulação e no tempo de processamento,

é substancial para a correta composição do modelo geométrico da simulação, pois os *pixels* trarão as dimensões das edificações e as larguras das vias, além das divisões das superfícies das vias entre leito carroçável de asfalto e passeios de pedestres, que geometricamente são múltiplos inteiros da dimensão escolhida para os *pixels*. Assim, quando na criação dos modelos de estudo, as dimensões dos *pixels* tiveram de ser estudadas, balanceado as necessidades do modelo e as possibilidades de tempo de processamento das simulações. Foram adotados *pixels* de 3m de dimensão na horizontal, pois são representativos dos tamanhos de vias com 9m, 12m, 15m... de largura, e são igualmente representativos de edifícios e lotes com dimensões que são facilmente aproximadas para múltiplos de 3m, que são valores corriqueiros em bairros residenciais de São Paulo e proporcionaram tempos viáveis de processamento. Para uma simplificação dos modelos, foi feito uso da função *telescoping*, que reduz paulatinamente a resolução vertical dos modelos à medida em que se eleva a altura, mantendo a resolução mais alta no nível da rua, onde foi feita a análise dos resultados.

Para os demais dados, o *software ENVI-met Monde* georreferencia o modelo através do *Google Earth* e inclui a topografia local através dos levantamentos da *NASA*. Neste caso, o modelo foi adotado como plano, sem topografia, uma vez que foi escolhida uma região aproximadamente plana para a simulação. Foi também definido o uso do asfalto preto comum como superfície do leito carroçável das vias e o pavimento de concreto "sujo" para as áreas de calçadas e interior de quadras (GUSSON, 2014). Estas superfícies foram colocadas sobre terreno de solo argiloso-arenoso melhor representativo da cidade de São Paulo (SHINZATO, 2014).

Foram utilizados para todas as edificações nos modelos os padrões de vedações verticais das construções em alvenaria de blocos cerâmicos maciços com revestimentos interno e externo em argamassa e coberturas de telhas cerâmicas de sobre camada de ar e laje de concreto maciça. Esta seleção de paredes e coberturas padronizadas é representativa do bairro, onde a maior parte das construções é formada por casas e sobrados com paredes de alvenaria de blocos cerâmicos maciços e coberturas de telhas cerâmicas sobre laje ou forro. Para as propriedades físicas e térmicas das paredes de fachadas e coberturas foram utilizados os valores de referência de transmitância térmica, condutividade térmica, absortância de superfície, emissividade e massa específica conforme diretrizes da NBR 15.220-2 (ABNT, 2013) e do PBE Edifica (INMETRO, 2017).

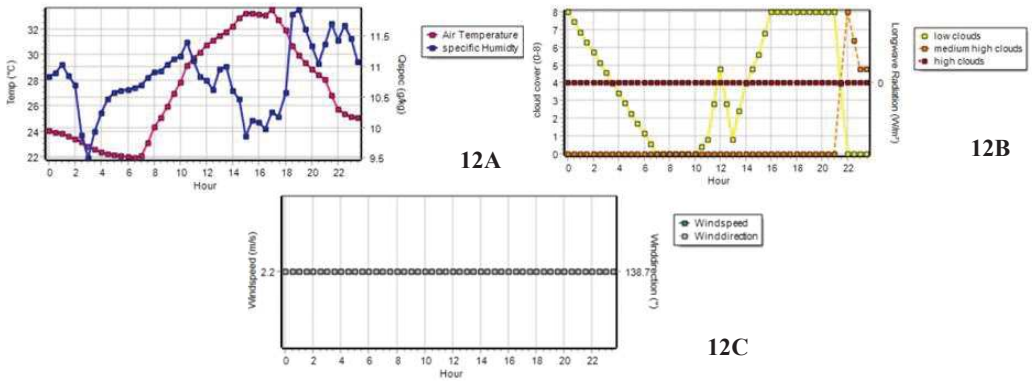
3.4. PROCESSO DE CALIBRAÇÃO DO MODELO CLIMÁTICO

As medições aferidas pelos equipamentos na laje de cobertura foram utilizadas para a calibração do modelo climático do *ENVI-met*, enquanto as medições da laje inferior foram utilizadas para análise comparativa. Foram também obtidos os dados de medições das estações meteorológicas do IAG/USP na Cidade Universitária (Zona Oeste de São Paulo) e Água Funda no Parque do Estado (Zona Sul de São Paulo). Os dados climáticos que são inseridos como *inputs* para a ferramenta *full forcing* do *ENVI*-met são utilizados como referência pelo modelo de cálculo do programa para aproximação nos limites externos dos modelos geométricos de simulação, isto é, em suas bordas. Ou seja, por meio dos balanços térmicos realizados a cada segundo em cada *pixel* do modelo, o *software* busca aproximar os resultados obtidos nas bordas do modelo aos dados da referência, a partir dos quais, por sua vez, serão calculados todos os demais resultados para todas as demais áreas e espaços do modelo.

Fazendo uso do modelo geométrico que reproduz o local onde foram realizadas as medições de dados microclimáticos, o processo de calibração do modelo climático consiste no *input* dos dados climáticos das medições empíricas e/ou de outros arquivos climáticos existentes para o local de medições e a realização dos devidos ajustes nos dados de entrada do arquivo climático e nas configurações do *software* para obter, no mesmo ponto onde foram realizadas as medições, resultados suficientemente aderentes às medições realizadas. Assim, a calibração do modelo foi realizada através de sucessivas simulações com pequenos ajustes nos modelos e nas configurações do *software* e de comparação dos resultados obtidos com os resultados das medições que serviram como referência. Na ausência de procedimentos normativos que pudessem instruir um parâmetro de tolerância máxima para o modelo de calibração, foi adotada como critério para aceitação do modelo calibrado a diferença máxima de 15% entre os valores medidos e os resultados das simulações para Temperatura do Ar (*Tar*), Umidade Relativa (*UR*), Velocidade do Vento (*Var*) e Direção do Vento, sendo que se obteve como resultados diferenças máximas inferiores a 0,5% no caso da Direção do Vento, a 5% no caso da Temperatura do Ar (*Tar*), a 10% para a Velocidade do Vento (*Var*) e a 15% para a Umidade Relativa (*UR*).

Foram realizadas 22 simulações para a calibração do software, buscando o modelo climático com a maior acurácia. Primeiramente foi especificada a localização georreferenciada do modelo, o que permite ao *ENVI-met* trazer dados locais: aspectos do clima local, altitude. Após, foram realizados diversos ajustes que envolveram: adoção do arquivo climático do Aeroporto de Congonhas como base dos dados, uso da ferramenta *forcing* com dados de Temperatura do Ar (*Tar*), Umidade Relativa (*UR*), nebulosidade, Velocidade do Ar (*Var*) e direção do vento das medições, *input* de radiação com base em dados de estação meteorológica, a altura do ponto de medições com relação ao solo em relação ao que foi efetivamente realizado em campo, o ajuste da Velocidade do Ar de entrada até se obter a velocidade de vento correta no ponto de medições, etc.

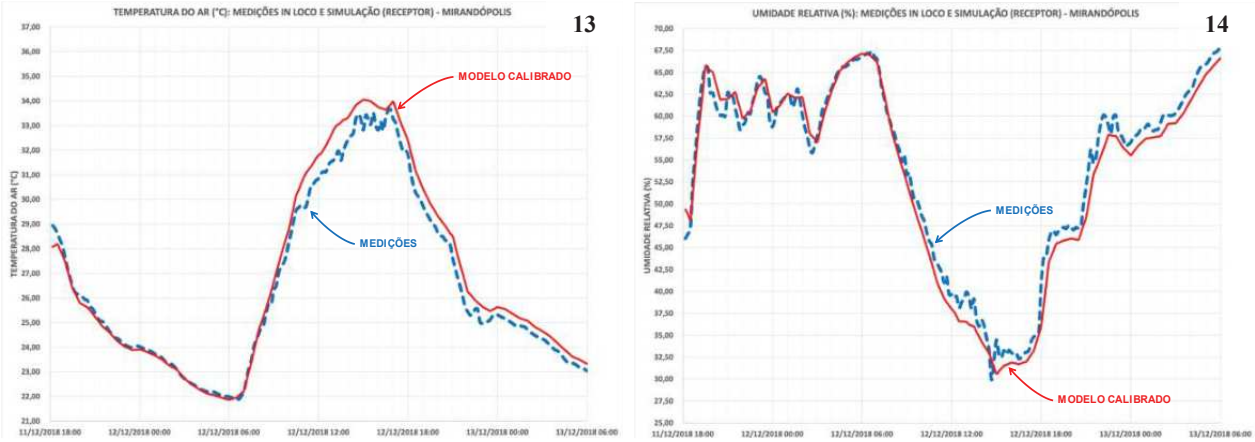
O modelo climático final calibrado, conforme Figuras 12A, 12B. e 12C, consiste em um período de simulação de 36 horas com início às 18h do dia 11/12 e encerramento às 6h do dia 13/12 fazendo uso da ferramenta *full forcing* adotando dados de entrada do arquivo climático do Aeroporto de Congonhas para o ano todo, sobrescrevendo os dados do arquivo climático pelos seguintes dados das medições empíricas e de estações meteorológicas entre 09/12 às 00h00 e 14/12 às 06h00: Direção do Vento de 138,7° (Sudeste) e Velocidade do Ar de 2,2 m/s na borda do modelo para obter no ponto de medições 1,5 m/s conforme medições empíricas; nebulosidade inserida em intervalos de 30 minutos conforme registros em intervalos de 60 minutos da Estação Meteorológica da Água Funda (Parque do Estado); Temperatura do Ar (*Tar*) e Umidade Relativa (*UR*) inseridas em intervalos de 30 minutos conforme medições empíricas em intervalos de 10 minutos.



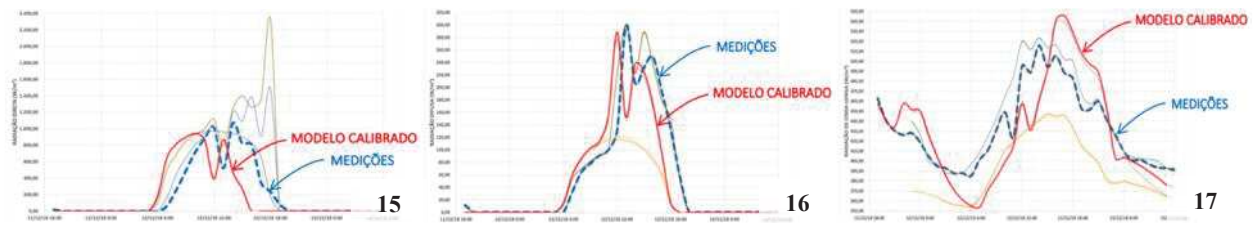
Figuras 12A, 12 B e 12C (da esquerda para a direita) – Dados de entrada (input) do arquivo climático final calibrado para o dia 12/12, incluindo Temperatura do Ar (*Tar*) e Umidade (*U*) (A), nebulosidade (B) e velocidade do vento (*Var*) (C) (NOVAES, 2020)

4. RESULTADOS

Para cada modelo de calibração foram realizadas comparações entre as medições e os resultados encontrados no receptor do modelo locado no ponto de medições a 7,50m de altura, comparando os valores de *Tar*, *UR*, *Var* e Direção do Vento. O modelo calibrado apresentou grande acurácia e precisão na reprodução dos dados das medições reais realizadas *in loco*, com diferenças máximas de 1,5°C (4,9%) para a *Tar* (Figura 13), de 5,4% (12,4%) para a *UR* (Figura 14), de 0,1m/s (7,7%) para a *Var*, e de 0,4° (0,3%), para a direção do vento. Como pode ser visto nas Figuras 15, 16 e 17, foi realizada uma comparação entre os registros de radiação (direta, difusa e de onda longa) entre o ponto de calibração no modelo de simulação e os dados registrados pela Estação Meteorológica do IAG para o mesmo período. Esta comparação foi realizada somente para efeito de análise crítica, visto que a Estação do IAG e o ponto de medições se localizam em regiões distintas.



Figuras 13 e 14 (da esquerda para a direita) – *Tar* (13) e *UR* (14) no modelo calibrado e medições (NOVAES, 2020)



Figuras 15, 16 e 17 (da esquerda para a direita) – Radiação direta (15), radiação difusa (16) e radiação de onda longa (17) no modelo calibrado e na Estação do IAG (NOVAES, 2020)

Enquanto os gráficos apresentam os resultados de todos os modelos de calibração em comparação com os dados reais de medição, passando por todos os ajustes até a obtenção do modelo final, as Tabelas 1 a 4 mostram que as diferenças máximas entre o modelo final calibrado e as medições reais foram todas obtidas dentro do critério de tolerância especificado (5% *Tar*, de 10% para *Var* e Direção do Vento e de 15% para *UR*). Assim, o modelo climático calibrado foi aprovado em função da apresentação de curvas de mesmo aspecto e pequenas diferenças de valores máximos e mínimos registrados, dentro dos limites de tolerância apresentados. Assim, o modelo foi considerado adequado para a realização das simulações.

TEMPERATURA DO AR (°C)	MEDIÇÃO: TAR (°C)	SIMULAÇÃO MODELO CALIBRADO: TAR (°C)	DIFERENÇA: SIMULAÇÃO - MEDIÇÃO (°C)	DIFERENÇA: SIMULAÇÃO - MEDIÇÃO (%)
MÉDIA	26,47	26,86	0,40	1,39%
MÁXIMO	33,65	34,04	**1,53**	**4,86%**
MÍNIMO	21,89	21,87	-0,22	-0,91%
DESVIO PADRÃO	3,64	3,96	0,40	1,33%

Tabela 1 – Valores de *Tar* nas medições empíricas e nos resultados da simulação do modelo calibrado (NOVAES, 2020)

UMIDADE RELATIVA (% UR)	MEDIÇÃO: UR (% UR)	SIMULAÇÃO MODELO CALIBRADO: UR (% UR)	DIFERENÇA: SIMULAÇÃO - MEDIÇÃO (% UR)	DIFERENÇA: SIMULAÇÃO - MEDIÇÃO (%)
MÉDIA	53,80	52,80	-1,06	-2,27%
MÁXIMO	67,94	67,11	2,59	7,36%
MÍNIMO	29,94	30,61	**-5,42**	**-12,37%**
DESVIO PADRÃO	10,92	11,47	1,26	2,75%

Tabela 2 – Valores de *UR* nas medições empíricas e nos resultados da simulação do modelo calibrado (NOVAES, 2020)

VELOCIDADE DO AR (m/s)	DADO DE ENTRADA: VELOCIDADE DO AR (m/s)	SIMULAÇÃO MODELO CALIBRADO: VAR (m/s)	DIFERENÇA: SIMULAÇÃO - MEDIÇÃO (m/s)	DIFERENÇA: SIMULAÇÃO - MEDIÇÃO (%)
MÉDIA	1,47	1,47	0,0042	0,289%
MÁXIMO	1,47	1,59	**0,1132**	**7,72%**
MÍNIMO	1,47	1,40	-0,0668	-4,55%
DESVIO PADRÃO	0,00	0,05	0,0490	3,34%

Tabela 3 – Valores de *Var* nas medições empíricas e nos resultados da simulação do modelo calibrado (NOVAES, 2020)

DIREÇÃO DO VENTO (°)	DADO DE ENTRADA: DIREÇÃO DO VENTO (°)	SIMULAÇÃO MODELO CALIBRADO: DIREÇÃO DO VENTO (°)	DIFERENÇA: SIMULAÇÃO - MEDIÇÃO (°)	DIFERENÇA: SIMULAÇÃO - MEDIÇÃO (%)
MÉDIA	138,70	138,74	0,05	0,04%
MÁXIMO	138,70	138,96	0,26	0,19%
MÍNIMO	138,70	138,30	**-0,37**	**-0,27%**
DESVIO PADRÃO	0,00	0,19	0,18	0,13%

Tabela 4 – Direção do Vento nas medições empíricas e nos resultados da simulação do modelo calibrado (NOVAES, 2020)

	RADIAÇÃO DIRETA		RADIAÇÃO DIFUSA		RADIAÇÃO DE ONDA LONGA	
	ESTAÇÃO IAG (W/m²)	SIMULAÇÃO (W/m²)	ESTAÇÃO IAG (W/m²)	SIMULAÇÃO (W/m²)	ESTAÇÃO IAG (W/m²)	SIMULAÇÃO (W/m²)
MÁXIMO	1.068,15	939,31	299,13	288,54	515,57	545,57
MÍNIMO	0,00	0,00	0,00	0,00	385,08	353,95

Tabela 5 - Comparação entre modelo calibrado e Estação IAG: Incidência de Radiação (NOVAES, 2020)

Por fim, a comparação entre a incidência de radiação do modelo calibrado e da Estação do IAG não deve ser utilizada para validação do modelo, mas sim para efeito de estudo, uma vez que, no modelo calibrado, foram utilizados como dados de entrada os dados de nebulosidade da Estação Água Funda, que forneceu somente os dados de nebulosidade, ao invés dos dados de radiação da Estação do IAG, que forneceu somente os dados de radiação. Verifica-se que o modelo calibrado apresentou razoável aderência aos dados de insolação da Estação do IAG, como fica nítido nas Figuras 13 a 17. A Tabela 5 mostra, de forma comparativa, a proximidade entre os valores máximos e mínimos de radiação direta, difusa e de onda longa registrados pela Estação do IAG e pela simulação do modelo climático calibrado com os dados de nebulosidade da Estação

Água Funda. Nota-se que há proximidade entre os valores registrados, sendo a radiação direta máxima da ordem de 1000 W/m², o que é esperado para São Paulo no verão.

Verificou-se uma leve tendência de supervalorizar o efeito de aquecimento diurno e queda de *UR*. Isto corrobora os achados de algumas pesquisas anteriores, que evidenciaram a supervalorização de algumas variáveis microclimáticas nas simulações, por exemplo, estudos em que os valores de Temperatura Radiante Média (*TRM*) foram superestimados, produzindo desvios em relação às medições no local (SHARMIN; STEEMERS; MATZARAKIS, 2017). Neste trabalho, em alguns modelos de controle, registrou-se um excesso de radiação direta incidente no período da tarde, quando, a radiação direta aumentava das 12h às 18h, chegando a 1500 W/m² e, com isso, gerando valores de *TRM* de mais de 90°C, incompatíveis com as medições. Este problema ocorria quando se utilizava o *full forcing* com dados inseridos de radiação solar, mas não ocorreu inserindo dados de nebulosidade, que geraram resultados confiáveis e adequados às medições *in loco* nos modelos de calibração (o que pode estar relacionado principalmente às diferentes entre os dados climáticos reais no ponto de medições e nas estações meteorológicas em que se obtiveram as medições de radiação e de nebulosidade, localizadas em outras regiões da cidade e estações diferentes, uma para nebulosidade, outra para radiação). Neste sentido, nos modelos, verificou-se uma leve tendência de supervalorizar o efeito de aquecimento diurno, com aumento da *Tar* e da *TRM* e queda de *UR*, maiores do que nas medições, durante o dia, em especial no período da tarde, porém dentro dos limites de tolerância adotados para este trabalho.

5. CONCLUSÕES

Através do *input* de resultados de medições empíricas de variáveis microclimáticas (temperatura do ar, umidade relativa, velocidade e direção do vento) em um ambiente existente da cidade de São Paulo, dos dados de nebulosidade da Estação Meteorológica Água Funda (IAG USP) e do arquivo climático histórico do Aeroporto de Congonhas como base, foi possível compor um modelo climático calibrado para a simulação de condições térmicas microclimáticas na cidade de São Paulo para um dia quente e seco, marcado por altas temperaturas do ar, baixa nebulosidade, alta incidência solar e baixas taxas de umidade relativa.

O modelo climático calibrado criado apresentou boa aderência de resultados às medições empíricas realizadas e aos dados de incidência de radiação da Estação Meteorológica do IAG USP, dentro dos limites de tolerância esperados, e pode ser utilizado para estudos envolvendo a simulação do desempenho térmico de espaços urbanos da cidade de São Paulo submetidos a estas condições. Assim, o modelo climático tem potencial para ser utilizado em estudos que analisam o comportamento do microclima urbano de São Paulo ao longo de dias quentes, permitindo, por exemplo, estudar as respostas de diferentes composições urbanas, de diferentes soluções geométricas da cidade, vegetações, etc.

Neste processo de calibração, foi possível evidenciar as vantagens do uso do *ENVI-met* para as simulações térmicas de espaços urbanos abertos e sua adequação e adaptabilidade para a simulação de modelos representativos do Brasil, em especial de São Paulo. O *ENVI-met* se mostra adequado para a simulação de espaços urbanos abertos em microescala, que permite associar a morfologia do espaço urbano às condições térmicas na cidade.

As simulações numéricas realizadas são confiáveis e fazem uso de motores de cálculo fundamentados em teorias consolidadas na bibliografia internacional com base em modelos físicos de termodinâmica e de mecânica dos fluídos, para determinar as trocas de calor e o balanço energético entre os diversos elementos e objetos do sistema (solo, edificações, massas vegetais, ar, superfícies, etc.) e a movimentação dos ventos pela geometria urbana através de sua relação direta com as condições predominantes locais, geometria e morfologia do local e influência mútua com as demais condições microclimáticas. Além disso, o *software* permite o uso de dados climáticos da cidade de São Paulo, através da inserção de dados históricos da climatologia local, permitindo ainda que, através de ferramentas como *full forcing*, sejam utilizadas medições empíricas reais para a calibração do motor de cálculo e características climatológicas locais para a simulação, aumentando a confiabilidade dos resultados encontrados. Com estas funções, o *ENVI-met* se torna adaptável e flexível para simulações em ambientes brasileiros, correspondendo às necessidades de simulação deste projeto de pesquisa.

Também foi possível evidenciar algumas dificuldades do processo de simulação com o *ENVI-met* em computador doméstico comum, em função da insuficiência de capacidade frente à grande demanda de processamento e tempo de computação para os cálculos das simulações. É requerida grande necessidade capacidade computacional, vasto espaço livre em disco e grandes quantidades de tempo para a simulação (nesta pesquisa, as simulações tiveram períodos de cálculo que variaram entre 70 e 100 horas aproximadamente). Isto decorre da grande quantidade de dados de parametrização do modelo e do conjunto de milhares de cálculos das condições térmicas em cada *pixel* do modelo a cada intervalo de tempo determinado.

A quantidade de dados necessários é sinérgica com a grande complexidade do microclima urbano, composto por diversas variáveis térmicas que, por sua vez, são impactadas por uma infinidade de variáveis do

espaço urbano quantificáveis ou não (geometria e volumetria das construções, traçado e orientação das vias, solo, vegetação, materiais, superfícies, clima local, condições meteorológicas do dia, disposição das massas construídas, objetos no meio urbano, etc.). Essa complexidade não impõe nenhum problema na simulação de uma área relativamente pequena do meio urbano, com um pequeno número de edifícios, mas para maiores escalas, como o *ENVI-met* está adotando uma abordagem holística de cálculo, o tempo de computação e a capacidade computacional se tornam substanciais, podendo ser um fator limitante para o estudo de modelos mais complexos, tornando, por vezes, necessário, reduzir a escala do estudo para diminuir o tempo de computação (SHARMIN; STEEMERS; MATZARAKIS, 2017).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. *NBR 15.220-2 - Desempenho térmico de edificações Parte 2 - Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações*. Rio de Janeiro: ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013.69.

BARBOSA, A. *Urbanismo Bioclimático - Efeitos do Desenho Urbano na Sensação Térmica*. São Carlos: Tese de Doutorado. Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (IAU USP), 2018.

BRANCO, L. M. B. C. *Microclimas Urbanos no Plano Piloto de Brasília - O caso da Superquadra 108* Sul. Brasília: Dissertação de Mestrado. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília (UnB), 2009.

BRUSE, M.; FLEER, H. *Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model*. Environment Modelling & Software, Bochum, 13 n. 3, 1 outubro 1998. 373-384.

ENVI_MET GMBH. *ENVI-met Model Architecture. ENVI-met - A holistic microclimate model*, 2018. Disponivel em: <http://www.envi-met.net/hg2e/doku.php?id=intro:modelconept>. Acesso em: 14 outubro 2018.

GUSSON, C. D. S. *Efeito da densidade construída sobre o microclima urbano - construção de diferentes cenários possíveis e seus efeitos no microclima para a cidade de São Paulo, SP*. São Paulo: Dissertação de Mestrado. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAU USP), 2014.

INMETRO. *Anexo Geral V – Catálogo de Propriedades Térmicas de Paredes, Coberturas e Vidros -p Anexo da Portaria Inmetro N. 50/2013 – Atualizado em 27/11*/2017. Brasília: Inmetro, 2017.

KRÜGER, E. L.; MINELLA, F. O.; RASIA, F. *Impact of urban geometry on outdoor thermal comfort and air quality from field measurements in Curitiba, Brazil*. Elsevier - Building and Environment, 46, 2011. 621-634.

NOVAES, G. B. A. *Impactos da Morfologia da Cidade nas Condições Microclimáticas de Áreas Urbanas Consolidads de São Paulo em Dias Quentes*. São Paulo: Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (FAU USP), 2020.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. *Mapa Digital da Cidade de São Paulo. GeoSampa Mapa*, 2019. Disponivel em: <http://geosampa.prefeitura.sp.gov.br/PaginasPublicas/_SBC.aspx>. Acesso em: 19 agosto 2019.

ROSHEIDAT, A.; HOFFMAN, D.; BRYAN, H. *Visualizing Pedestrian Comfort Using ENVI-met. SimBuild 2008*. Third National Conference of IBPSA-USA. Berkeley, California. Berkeley, California: SimBuild 2008. 2008.

SEÇÃO TÉCNICA DE SERVIÇOS METEOROLÓGICOS DO IAG/USP. *Boletim Climatológico Anual da Estação Meteorológica do IAG/USP*. São Paulo: Seção Técnica de Serviços Meteorológicos do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, 2018.

SHARMIN, T.; STEEMERS, K.; MATZARAKIS, *A. Microclimatic modelling in assessing the impact of urban geometry on urban thermal environment*. Elsevier - Sustainable Cities and Society, 34, 2017. 293-308.

SHINZATO, P. *Impacto da Vegetação nos Microclimas Urbanos em Função das Interações Solo-Vegetação-Atmosfera*. São Paulo: Tese de Doutorado. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, 2014.

AGRADECIMEN*TOS*

Agradeço à Seção Técnica de Serviços Meteorológicos do IAG/USP e ao Departamento de Ciências Atmosféricas do IAG/USP, pelo fornecimento de dados das medições meteorológicas das estações Água Funda, no Parque do Estado, e IAG USP, na Cidade Universitária. Também agradeço ao LABAUT FAU USP, pelo empréstimo e manuseio dos equipamentos de medição utilizados.